

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

| Open Access Journal |

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

CODEN: IJWSET OCLC Number: 828807274 ZDB-ID: 2703985-7

Volume (xi) - Issue 1 – May 2026

Water - **B**lue-Green Infrastructure - **C**limate'2026



Water-Blue Green Infrastructure-Climate:

Freshwater: Blue and Green

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and
the Environment in Tunisia (*ASTEETunisia*)

International Scientific Committee (ISC-WBC'2026)

Nouredine Gaaloul

Hamadi Habaieb

Zouhaier Hlaoui

Adel Kharroubi

Rachid Boukchicha

Nouredine Hamdi

Taoufik Hermassi

Mohamed Habib Sellami

Hechmi Belaid

Rim Katlane

Abir Ben Hassine

Ibrahim Amadou Traoré

Mohamed Meddi

Azzedine Hani

Larbi Djabri

Salah Eddine Ali Rahmani

Saadane Djorji

Mohammed Achite

Abdelhalim Yahiaoui

Mohamed Bessenasse

Benadjji Nonry

Abdessamad Merzouk

Beloulou Laroussi

Abdelhalim Yahiaoui

Gnengazji Saadia

Gwendouze Abdelhamid

Khoualdia Wacila

Belkacem Bekkoussa

Ali Essahlaoui

El Ouadi Abdelhadi

Abdellah El Hmaidi

Imad Manssouri

Abdelmajid Moumen

Mhamed Amray

Abdelaziz Abdallaoui

Nadia Lablou

Amadou Thierno Gaye

Sousou Sambou

Diop Ngom Fatou

Abdoulaye Faty

Soro Nagnin

Gnamba Franck Maxime

Soro Nagnin

Cusib Ngonzo Luwesi

Kousoubon A. Leonard

Koumassi Dégla Hervé

Hamma Yaacoub

Harouna Karambirir

Lienou Gaston

Gnandi Kissao

Hamadoun Bokar

Salina Sanou

Saeid Eslamian

Amadou Gaye

Richard Anyah

Benjamin Lamptey

Aqeel Al-Adili

Moumtaz Razack

Lucila Candella

Fotis K. Pliakas

Andreas Kallioras

Christoph Schüth

Jean-François Delège

Prof. University of Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisia)

Prof. University of Carthage – IRESA - INAT (Tunisia)

Prof. University of Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisia)

Prof. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)

M.Conf. University of Gabès – ISSTEG (Tunisia)

Prof. Université of Gabès – ISSTEG (Tunisia)

M.Conf. University of Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisia)

M.Conf. University of Jendouba – IRESA- ESIM (Tunisia)

M. Assistant. University of Jendouba -IRESA- ESIM (Tunisia)

M.Conf. University of Manouba - Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités (Tunisia)

M.Conf. University of Tunis (Tunisia)

Expert Hydrogeologist

Prof. ENSH, (Algeria)

Prof. Univ. Annaba (Algeria)

Prof. Univ. Annaba (Algeria)

Prof. University Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algeria)

Prof. University of Annaba (Algeria)

Prof. University of Chlef (Algeria)

Prof. University of Bechar (Algeria)

Prof. University of Saad Dahlab- Blida (Algeria)

Prof. University of Tlemcen (Algeria)

Prof. University of Tlemcen (Algeria)

Prof. University Badji Mokhtar, Annaba (Algeria)

M.Conf. Univ. Bechar (Algeria)

M.Conf. University of Biskra (Algeria)

M.Conf. University of Blida1 (Algeria)

M.Conf. University of Souk-Abras (Algeria)

M.Conf. University Mustapha Stambouli de Mascara (Algeria)

Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)

Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)

Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)

Prof. University Moulay Ismail Meknes ((Morocco)

Prof. University Nadour ((Morocco)

Prof. University of Fès ((Morocco)

Prof. University Moulay Ismail ((Morocco)

M.Conf. University Mohamed V Rabat ((Morocco)

Prof. University of Cheikh Anta Diop, Dakar, (Senegal)

Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)

Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Senegal)

Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST ((Senegal)

Prof. UFR STRM (Ivory Coast)

Prof. UFR STRM (Ivory Coast)

Prof. UFR STRM (Ivory Coast))

Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)

Prof. FLLAC/ UAC (Congo)

Prof. LACEEDE/ UAC (Benin)

Prof. 2iE (Burkina Faso)

Prof. 2iE (Burkina Faso)

Prof. Univ. Yaoundé (Cameroun)

Prof. Univ. Lomé (Togo)

Prof. Univ. ENI-abt (Mali)

Pan African Climate Justice Alliance (Kenya)

Prof. University of. Isfahan (Iran)

Prof. CR4D (Ethiopia)

Prof. CR4D (Ethiopia)

Prof. CR4D (Ethiopia)

Prof. Univ. Technology (Iraq)

Prof. University of Poitiers (France)

Prof. Univ. Catalonia (Spain)

Prof. Univ. Thrace (Greece)

Prof. Univ. Athens (Greece)

Prof. Tech.Univ. Darmstrad (Germany)

Prof. University of Liège (Belgium)

Preface



W

ater is under extreme threat of climate change: severe droughts and

flooding threaten people's access to clean water. More than 40 percent of the global population will live in water scarce areas by 2050. It is up to us to protect and maintain our precious water resources for today and tomorrow!

"Water is the bloodstream of the biosphere. But we are profoundly changing the water cycle. This is now affecting the health of the entire planet, making it significantly less resilient to shocks," says lead author Lan Wang-Erlandsson from the Stockholm Resilience Centre (SRC) at Stockholm University.

Human activities have altered the water cycles at local, continental, and global scales. These modifications have far-reaching impacts on biodiversity, food and health security, ecological processes, and climate regulation, ultimately impacting the resilience of both terrestrial and aquatic ecosystems.

It is imperative to establish a planetary boundary for freshwater resources, as they ensure the preservation of adequate blue water resources for aquatic ecosystems and green water flows for moisture feedback.

Blue water refers to surface and groundwater resources, such as rivers, lakes, and aquifers.

Green water is the water stored in soil and vegetation, primarily used by plants through processes like evapotranspiration.

Blue water (rivers, groundwater) and green water (soil moisture, plants) are two essential components of the water cycle, strongly influenced by climate. Climate change exacerbates their imbalance, intensifying droughts (lack of green water) and altering ocean colors (proliferation of green phytoplankton).

Climate change is expected to result in more intense and longer-lasting droughts and increase in the frequency and intensity of heavy rainfall events. The combination of drought followed by intense rainfall increases the risk of severe flooding, with impacts on a range of natural and anthropogenic systems, including infrastructure (road washouts, damage to houses) and impacts on agriculture (soil erosion and loss of crops and livestock). Blue-Green Infrastructure (BGI) is an interconnected network of natural and designed landscape components, including water bodies and green and open spaces, which provide multiple functions such as: (i) water storage for irrigation and industry use, (ii) flood control, (iii) wetland areas for wildlife habitat or water purification, and many others.

Noureddine Gaaloul

Professor of higher education and full Researcher in the National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry (University of Carthage- IRESA- INRGREF-Tunis).

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies

President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE ^{Tunisia})

www.iistee.org

Preface



L'eau est extrêmement menacée par le changement climatique : de graves sécheresses et inondations menacent l'accès des populations à l'eau potable. D'ici 2050, plus de 40 % de la population mondiale vivra dans des régions où l'eau est rare. Il nous appartient de protéger et de maintenir nos précieuses ressources en eau pour aujourd'hui et pour demain !

« L'eau est le système sanguin de la biosphère. Mais nous modifions profondément le cycle de l'eau. Cette situation affecte désormais la santé de la planète tout entière, la rendant nettement moins résiliente face aux chocs », explique l'auteur principal, Lan Wang-Erlandsson, du Stockholm Resilience Centre (SRC) de l'Université de Stockholm.

Les activités humaines ont modifié les cycles de l'eau à l'échelle locale, continentale et mondiale. Ces modifications ont des répercussions considérables sur la biodiversité, la sécurité alimentaire et sanitaire, les processus écologiques et la régulation climatique, affectant en fin de compte la résilience des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Il est impératif d'établir une limite planétaire pour les ressources en eau douce, car elle garantit la préservation de ressources en eau bleue suffisantes pour les écosystèmes aquatiques et de flux d'eau verte essentiels au maintien de l'humidité.

L'eau bleue désigne les ressources en eau de surface et souterraines, telles que les rivières, les lacs et les aquifères.

L'eau verte est l'eau stockée dans le sol et la végétation, principalement utilisée par les plantes grâce à des processus comme l'évapotranspiration.

L'eau bleue (rivières, nappes) et l'eau verte (humidité du sol, plantes) sont deux composantes essentielles du cycle de l'eau, fortement influencées par le climat. Le réchauffement climatique accentue leur déséquilibre, intensifiant les sécheresses (manque d'eau verte) et modifiant les couleurs océaniques (prolifération de phytoplancton vert).

Le changement climatique devrait entraîner des sécheresses plus intenses et prolongées, ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de fortes pluies. L'alternance de sécheresse et de fortes précipitations accroît le risque d'inondations graves, avec des répercussions sur divers systèmes naturels et anthropiques, notamment les infrastructures (affaissement des routes, dégâts aux habitations) et l'agriculture (érosion des sols, pertes de récoltes et de bétail). L'infrastructure bleue-verte (IBV) est un réseau interconnecté d'éléments paysagers naturels et aménagés, comprenant des plans d'eau et des espaces verts, qui remplissent de multiples fonctions telles que : (i) le stockage de l'eau pour l'irrigation et l'industrie, (ii) la protection contre les inondations, (iii) les zones humides servant d'habitat à la faune sauvage ou de zone de purification de l'eau, et bien d'autres

Noureddine Gaaloul

Professor of higher education and full Researcher in the National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry (University of Carthage- IRESA- INRGREF-Tunis).

Founder and Chief Editor International Journal Water Science and Environment Technologies

President of Scientific and Technical Association for Water and the Environment in Tunisia (ASTEE *Tunisienne*)

www.ijsstec.org

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET) *Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE)* www.jistee.org

|Open Access Journal|

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
10 Volumes, 35 Issues, (438 Papers) and 1 Book

*Book (01): Why green water saving is not fully rewarded by farmers in mount kenya region
A research frontier of pure: applied sciences and engineering. 120 pages. August 2022*

Volume (xi): 4 Issues (Papers) Water - Blue-Green Infrastructure -Climate'2026

Issue 1 – May 2026 (6 Papers) *Water - Blue-Green Infrastructure -Climate'2026; Freshwater: Blue and Green Water*

Volume (x): 4 Issues (33 Papers) Water -Biodiversity-Climate'2025

Issue 1 – March 2025 (10 Papers) *Water Biodiversity and Climate Change*

Issue 2 – October 2025 (6 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Water resources modeling uses Geographic Information System*

Issue 3 – November 2025 (7 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Biodiversity, Sustainable Water Security and Climate Change*

Issue 4 – December 2025 (11 Papers) *Water-Biodiversity-Climate: Sustainable Qualitative and quantitative characterization of water resources*

Volume (ix): 4 Issues (25 Papers) Water -Agriculture-Climate'2024

Issue 1 – July 2024 (6 Papers) *Water-Agriculture and Climate Change*

Issue 2 – Octobre 2024 (10 Papers) *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security Qualitative and quantitative characterization of water ressource*

Issue 4 – Novembre 2024 (4 Papers): *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing*

Issue 4 –Decembre 2024 (5 Papers) *Water, Agriculture, Climate Change and Food Security: Water-Agriculture and Food Security and Climate Change*

Volume (viii): 4 Issues (27 Papers) Water -Drought-Climate'2023

Issue 1 – March 2023 (6 Papers) *Water Scarcity, Rising Temperatures. Facing Climate Change, from the Fight to Adaptation?*

Issue 2 – December 2023 (11 Papers) *Water -Drought-Climate'2023 Integrated Water Resources Management*

Issue 4 – December 2023 (6 Papers) *Water -Drought-Climate'2023 Reuse of treated wastewater in agriculture*

Issue 4 – December 2023 (7 Papers) *Water -Drought-Climate'2023 Climate Change and Adaptation*

Volume (vii): 4 Issues (32 Papers) Water -Health-Climate'2022

Issue 1 – March 2022 (7 Papers) *Climate change: What effects on our health?*

Issue 2 – June 2022 (10 Papers) *Impacts of Climate Change on Water, Ecosystems and Human Health*

Issue 4 – September 2022 (7 Papers) *Water, Climate, Health, Disparities: Solutions*

Issue 4 – December 2022 (8 Papers) *Climate Changes Health: Water Quality and Accessibility*

Volume (vi): 4 Issues (31 Papers) Water -Agriculture-Climate'2021

Issue 1 – April 2021 (11 Papers) *Faced with climate and food issues: Reinventing Water-Agriculture-Climate relations*

Issue 2 – June 2021 (6 Papers) *Climate Change, Water, Agriculture - What trajectories?*

Issue 4 – September 2021 (6 Papers) *Climate Change, Water and Agriculture Towards Resilient Systems*

Issue 4 – December 2021(8 Papers) *Climate Change, Water and Agriculture: What Strategies?*

Volume (v): 2 Issues (27 Papers) Water -Climate'2020

Issue 1 – September 2020 (14 Papers) *Water Resources and Climate Change.*

Issue 2 – Décembre 2020 (13 Papers) *Integrated Water Resources Management and Climate Change*

Volume (iv): 2 Issues (68 Papers) Water -Energy-Climate'2019

Issue 1 – December 2019 (56 Papers) *Integrated Water Resources Management*

Issue 2 – December 2019 (12 Papers) *Renewable Energies and climate change*

Volume (iii): 3 Issues (103 Papers) Water -Environnement-Climate'2018

Issue 1 – April 2018 (62 Papers) *Water Resources Management*

Issue 2 – August 2018 (34 Papers) *Environmental Earth Sciences*

Volume (ii): 5 Issues (53 Papers) Water -Society-Climate'2017

Issue 1 – February 2017 (17 Papers) *Qualitative and quantitative characterization of water resources.*

Issue 2 – April 2017 (8 Papers) *Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change*

Issue 4 – June 2017 (9 Papers) *Vulnerability of Water Resources to Climate Change.*

Issue 4 – August 2017(8 Papers) *Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources*

Issue 5 – October 2017(11 Papers) *Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology*

Volume (i): 3 Issues (36 Papers) Water -Climate'2014

Issue 1 – April 2014 (17 Papers) *Surface Water Resources in the Mediterranean Region.*

Issue 2 – August 2014 (8 Papers): *Ground Water Resources in the Mediterranean Region*

Issue 4 – December 2014 (11 Papers) *Climate Change in the Mediterranean Region*

Copyright © 2025 – Jistee Tous droits réservés



Table of Contents

Abir Ben Hassine (Faculty of Sciences of Tunis (FST), Tunis El Manar University, Tunisia.)), <i>Gaaloul Noureddine</i> . Sustainable Blue-Green Infrastructure: New International Vision	6
Wahida Matoussi (Laboratoire Des Ressources Sylvio-Pastorales Institut Sylvio-Pastoral de Tabarka, University of Jendouba, Tabarka, Tunisia), <i>Sabar Abidi</i> . Drought Intensification and Hydrological Regime Shifts in Tunisia's Medjerda High Valley	19
Gbènkpon Constantin Gandji (Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi, BP 1338 DGAT) <i>Romarc Ogonwale 1,2, Ibouaïma Yabi</i> Actions anthropiques et dynamique hydroclimatique sur les petits lacs au Sud-Est du Bénin (Commune de Ouinhi)	27
Ibrahima Mbaye Université Assane SECK de Ziguinchor, UFR des Sciences et Technologies, Département de Géographie, Sénégal, <i>Mariama Dia</i> Perception des impacts socio-économiques et stratégies de résilience du tourisme face à la Covid-19 (Petite Côte-Sénégal)	40
Salifou Issa Université de Diffa, Niger. Evaluation de la qualité des eaux en sachet vendues dans la commune de Diffa au Niger ; <i>Toudjani Assane Anabi3, Abdourahmane Barry4, Zanguina Adamou, Ibrahim Nataton</i> .	51
Moutakilou Assoumanou Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey, Abomey, Bénin. Cartographie des zones à risque d'inondation dans la commune d'athiémé au sud-ouest du bénin. <i>Alda S. Y. Yemadje, W. Arnaud A. Akakpo</i>	60

www.istee.org

|Open Access Journal|

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Sustainable Blue-Green Infrastructure: new international vision

Abir Ben Hassine¹, Gaaloul Nouredine²

¹Assistant Professor of Biology. Faculty of Sciences of Tunis (FST), Tunis el Manar University. Tunisia

² Professor National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry (INRGREF – IRESA-University of Carthage), Tunisia

Abstract

Blue-Green Infrastructure (BGI) is an approach to urban flood resilience, recognised globally and in international literature, that capitalises on the benefits of working with urban green-spaces and naturalised water-flows. Literature reveals BGI's sustainable functioning and benefits-provision depend on the behaviour of those who use it, therefore local stewardship is often proposed to support maintenance. However, there is a gap in understanding the requirements and behaviours of users, as well as their potential for developing stewardship behaviours, that is not addressed through traditional analysis approaches based around demographics

Keywords: Climate Change, Extreme Events, Sustainability, Resilience, Blue-Green Infrastructure (BGI)

Infrastructure Bleue-Verte Durable : une nouvelle vision internationale

Résumé

L'infrastructure Bleue-Verte (TBV) est une approche de la résilience urbaine face aux inondations, reconnue mondialement et documentée dans la littérature internationale, qui tire parti des avantages des espaces verts urbains et des cours d'eau naturalisés. La littérature révèle que le fonctionnement durable de l'TBV et ses bénéfices dépendent du comportement de ses usagers ; c'est pourquoi une gestion locale est souvent proposée pour soutenir son entretien. Cependant, les approches analytiques traditionnelles, basées sur les données démographiques, ne permettent pas de comprendre pleinement les besoins et les comportements des usagers, ni leur potentiel à adopter des comportements responsables.

Mots clés : Changement climatique, événements extrêmes, durabilité, résilience, Infrastructures Bleues et Vertes

¹ Corresponding author: gaaloul.nouredine@iresa.agrinet.tn

1. INTRODUCTION

Without water, there is no agriculture, and a great deal of it is needed (approximately 3,000 liters per person per day – 90% of the total used by humans) to ensure our food supply. The issue of water is therefore essentially an agricultural/food issue, and vice versa. Three-quarters of this water is "green" water (rainwater used directly by rainfed crops), and one-quarter is "blue" water (water withdrawn for irrigated crops). Irrigation is of strategic importance: one irrigated hectare is on average three times more productive than one hectare of rainfed land, and irrigated crops account for 40% of global production. However, fresh water, whatever one might say, is a generally abundant resource since the total used for food production represents only 6% of the total resource.

Blue-Green Infrastructure (BGI) is a planned network of natural and semi-natural areas—combining vegetation ("green") and water bodies ("blue")—designed to manage urban water, reduce flood risks, and enhance biodiversity. It acts as a sustainable, nature-based alternative to traditional "grey" concrete infrastructure, providing climate resilience, cooling effect, and improved urban life quality.

Blue-Green Infrastructure (BGI) is regarded as a more nature-friendly means of managing urban flood-risk (particularly pluvial). The phrase 'blue-green' or 'green/blue' infrastructure emerged around the turn of the last decade (Gledhill and James, 2008, Selman, 2008) from a growing awareness of the need for a more integrated systems-approach to the management of Green and Blue Infrastructure. Ghofrani, Sposito, and Faggian (2017, 15) describe BGI as 'an interconnected network of natural and designed landscape components, including water bodies and green and open spaces'; a short list of examples could include green roofs, retention and detention ponds, re-naturalised and de-culverted rivers, swales and 'bioswales', or rain gardens (Abbott et al., 2013). BGI has been argued to offer multiple further benefits, such as improvements in air and water quality, aesthetics, biodiversity and amenity (Hoyer et al., 2011, Lawson et al., 2014). As a result, it is increasingly seen internationally as an effective way of managing flood risk and simultaneously improving the public realm (Alves et al., 2018, Hoyer et al., 2011, Jiang et al., 2018, Shandas et al., 2010, Wong and Eadie, 2000).

The Blue and Green Infrastructure (BGI) aims to combat the erosion of biodiversity caused by habitat fragmentation and destruction resulting from human activities (Alphandéry et al., 2012). Landscape fragmentation is characterized by both the fragmentation, isolation, and reduction of the surface area of natural habitats and by changes in connectivity between habitat patches (Janin, 2011). Landscape connectivity is understood as the degree to which landscape features facilitate or impede the movement of species between different habitats (Taylor et al., 1993). It therefore depends on both the structure and spatial organization of the habitat and how species interact with this environment (Calabrese and Fagan, 2004; Taylor et al., 1993). Landscape fragmentation hinders the movement of both animal and plant species (Ritchie, et al., 2009). It affects the ecological balance by disrupting the hunting and reproductive activities of species, but also by reducing interactions between individuals, which limits the genetic diversity of populations (Fahrig, 2011, Henkel, 2015).

In order to limit these effects, it is necessary to implement management measures to restore connectivity between habitats. Based on the principles of landscape ecology, the Blue and Green Infrastructure ((BGI)) aims to create a viable ecological network for species, made up of biodiversity reservoirs and terrestrial or aquatic corridors (Burel and Baudry, 1999, Bennet, 1991).

The first type of habitat is the areas where biodiversity is best represented and where species can complete all or part of their life cycle, i.e., feed, reproduce, and rest (Arnould et al., 2011; Linglart et al., 2016). These areas are linked by corridors that constitute "functional links" (Arnould et al., 2011), allowing the movement of species or groups of species between different habitats (Clergeau and Désiré, 1999). Biodiversity-based ecosystems (GBEs) have been developed and studied at the regional level through the development of Regional Ecological Coherence Schemes (SRCEs) (Amsallem et al., 2010).

The establishment of a network of Green and Blue Infrastructure relies on several methodologies that presuppose a territorial assessment, but no universal method is proposed. Regions can therefore choose the method for identifying Green and Blue Infrastructure that best suits their needs (Vanpeene-Bhuier and Amsallem, 2014). However, the different approaches must take into account criteria defined at the national level, such as the integration of regulatory zoning, inventories, or elements of national importance (Vanpeene-Bhuier and Amsallem, 2014). Three main methods are commonly used to identify ecological corridors: visual interpretation analysis, analysis of permeability of the environment, and the use of a dilation-erosion treatment (Amsallem et al., 2010; Bernier and Théau, 2013), but these methods are rarely compared with one another (Vanpeene-Bhuier and Amsallem, 2014). These methods translate into two major types of approaches. The first relies on the study of habitats and their organization; this is known as the structural approach. The second focuses on species' responses

to environments by using information on ecological functions through a functional approach (Fu, et al., 2010, Girardet, et al., 2013).

Green infrastructure refers to multifunctional green spaces that can be adopted in urban and rural landscapes, and that improve the quality of life and environmental benefits for communities. Green infrastructure facilitates ecosystem-based initiatives such as roof gardens, vertical gardens, open green spaces, public parks, etc., that support climate change mitigation, disaster resilience, and community wellbeing. Blue infrastructure facilitates water-associated ecosystems for the same purpose above. This includes urban ponds, rain gardens, wetlands, canals, and other water-associated ecosystems. Under the nature- and ecosystems-based solutions for disaster risk reduction, green and blue infrastructure features are encouraged as an environmentally sustainable solutions for making communities resilient. However, understanding of policies concerning green and blue infrastructure and their support among decision-makers and practitioners needs to improve. In addressing this scope, this paper aims to understand the policy support for green and blue infrastructure implementation towards disaster risk reduction for better preparedness among local and national communities

Green infrastructure was developed as an alternative to legacy stormwater management systems, which are known in this context as gray infrastructure. Gray infrastructure takes its name from the fact that much of it is constructed from concrete and steel. It consists of a network of gutters, sewers, ditches, dams, sewage tunnels, permeable pavement, and pipes that divert stormwater away from inhabited areas and reroute it to natural bodies of water or to water treatment facilities. Gray infrastructure also collects and delivers household graywater to sewage treatment plants. The term “graywater” describes any type of wastewater not contaminated with human waste; it primarily includes drainage from fixtures and appliances like bathtubs, showers, dishwashers, and washing machines.

Gray infrastructure primarily uses a centralized approach to stormwater and wastewater management, capturing and collecting incoming water before strategically diverting it to a planned destination. It is designed to reproduce nature’s ability to absorb and retain water but offers limited utility beyond its primary purpose. The gray infrastructure installed in many urban centers is also aging, having handled large volumes of stormwater and wastewater for decades.

Green infrastructure initially evolved as a complementary system to supplement existing gray infrastructure in need of upgrading or replacement. These coupled systems are sometimes referred to as green-gray infrastructure, and they are effective at reducing the heavy water volumes that erode gray infrastructure. Unlike gray infrastructure, green infrastructure is also capable of harvesting urban rainwater and utilizing it as part of a wider water resource management strategy, which serves as a key example of its broader set of case-uses.

Research into the economic benefits of coupled systems have found that they offer significant long-term cost savings. A study published in the academic journal *Resources, Conservation & Recycling* (Xu, Tang, Haifeng, and Xu, 2019) reported that green-gray infrastructure systems have the potential to cut lifecycle costs by as much as 94 percent when compared to gray-only infrastructure. The study recommended investing in the optimization of coupled systems and encouraged urban planners to make increased use of green infrastructure technologies in their municipal stormwater and wastewater management plans. The study reflects a growing sentiment among policymakers and urban planners to make more conscientious use of green and blue-green approaches to local development.

The notion of ecological resilience was first elaborated by Holling in a seminal article published in 1973 (Holling, 1973). This perspective developed from population and landscape ecology and applied resource management. Holling’s insight incorporates three concepts of changes that occur in an ecosystem over time. The first described the “persistence of relationships within a system” and the “ability of systems to absorb changes of state variables, driving variables, and parameters, and still persist” (Holling, 1973). The second concept recognized the occurrence of alternative and multiple states in a system as opposed to the assumption of a single equilibrium and global stability; therefore, resilience is “the size of stability domain or the amount of disturbance a system could take before it shifted to an alternative configuration” (Holling, 1973). The third notion was the surprise and discontinuous nature of change.

Weather extremes (droughts and floods) are an accepted component of coupled human-environment systems. There is a strong need for an anthropogenic modification of the environment in response to climate and weather over time and development of “sustainable” engineering solutions. BGI, as one of those solutions, provides a proven, sustainable, underpinning of development that protects against floods and offers a range of other benefits with no down sides. The driver of climate change and increased extreme weather means we need to implement systems like BGI if we wish to have sustainable and resilient settlements. There is no comprehensive synthesis of BGI, and given its growing importance, there is need for a review

2 BRIEF HISTORY BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE (BGI)

Experts often characterize the concept of green infrastructure as an outgrowth of the modern environmental movement, which rose to national prominence in the United States during the late 1960s and became a major topic of sociopolitical concern in the 1980s and 1990s. Scholarly analysis of the history of green infrastructure notes the concept's interdisciplinary roots. Its underlying principles evolved over decades, leading to the first known usage of the term in 1994 when policymakers referenced "green infrastructure" in a land conservation report prepared for Florida's then-governor Lawton Chiles. The report highlighted the importance and effectiveness of natural systems as complements to human-made infrastructural assets, noting that gray infrastructure requires thorough long-term planning and positing that policymakers therefore have ample opportunity to incorporate green infrastructure into their wastewater management strategies.

In 1995, author Charles E. Little published the book *Greenways for America*, which experts credit with popularizing the term "greenways." The greenways movement, which gained momentum following the book's publication, seeks to establish and maintain landscaped spaces in urban, semiurban, and rural areas. Greenways are viewed as a means of encouraging outdoor recreation and linking a region's parks and nature preserves through an interconnected network of paths and trails. The greenways movement foretold the subsequent rise in interest surrounding green infrastructure by formally importing the concept of landscape ecology into urban and regional planning.

The EPA formally adopted the term "green infrastructure" in 2007, using it to describe a novel approach to low-impact stormwater management, which endeavors to apply natural hydrologic processes to engineered systems. During the 2000s, urban planners, civil engineers, and policymakers began to recognize the ecological and cost-efficiency potential of using ecological services to meet community-based needs. This touched off a concerted move toward scale planning that incorporated landscape and nature features into their designs at increasing rates. The trend reflected an underlying realization among localities that nature conservation and the restoration of natural landscapes were vitally important to building sustainable, healthier, and more livable communities.

In 2006, a landmark study examined the financial value of strategically using tree cover as a means of improving air quality and managing stormwater volumes. Its findings were jointly published by researchers Edward McMahon and Mark A. Benedict in their book *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. The researchers concluded that tree cover held the potential to save U.S. municipalities as much as \$400 billion in air quality mitigation, water treatment, biofilter, and stormwater pond investments.

Also in 2006, multiple agencies of the US federal government produced a report titled *Ecological: An Ecosystem Approach to Developing Infrastructure Projects*. Though the work mainly focused on sustainable transportation and road design practices, it signaled growing government recognition of eco-conscious infrastructure development. The Green Infrastructure Center, a Virginia-based nonprofit organization that helps communities make more environmentally conscious planning decisions, was also established that year. The Trust for Public Land, another eco-protection nonprofit group, has since financed and published multiple academic studies into green infrastructure. These studies examine the social and financial benefits of green spaces in urban planning, noting their multifaceted potential as effective ways to bridge access gaps to outdoor recreation opportunities while making better use of natural resources.

As the concepts of green and blue-green infrastructure have developed, they have been taken up by policymakers, urban planners, and stakeholders in many countries around the world. The European Commission (EC) the executive authority of the European Union (EU) now maintains an official green infrastructure strategy. East Asian countries including China and Japan continue to deepen their investments in green infrastructure, while the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia's national scientific agency, has created a "national agenda" for making increased use of green infrastructure principles and technologies in the nation's urban areas.

In 2019, US lawmakers passed the Water Infrastructure Improvement Act. The legislation formally incorporated the EPA's integrated planning (IP) principles into federal law, giving municipalities and regional governments new paths to planning and financing green infrastructure additions to their existing stormwater and wastewater management systems. Notably, the Water Infrastructure Improvement Act also contains a specific description of "green infrastructure," which now serves as the standard definition used by US federal agencies. It describes green infrastructure as "the range of measures that use plant or soil systems, permeable pavement or other permeable surfaces or substrates, stormwater harvest and reuse, or landscaping to store, infiltrate, or evapotranspire stormwater and reduce flows to sewer systems or to surface waters."

3. OVERVIEW SUSTAINABLE BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE

In the last three decades, several alternative ap- proaches have suggested different ways to ad- dress sustainability and sustainable development. The more traditional ap- proaches are anthropocentric (also referred to as “weak” approaches to sustainability). These consider nature as something external to hu- mans, a resource to be consumed and exploited, but with moderation to make it last. Instead, an eco-centric approach (or “strong” approach to sustainability) presents so- cial systems and nature as co-evolving in mutual, complicated interaction and, therefore, takes into consideration a balance of social require- ments, ecological restrictions, and quality of life. The global water problem is not a problem of quantity but a problem of distribution, access, and the risk of cascading instabilities. It is indeed necessary to distinguish several types of regions (Figure 1).

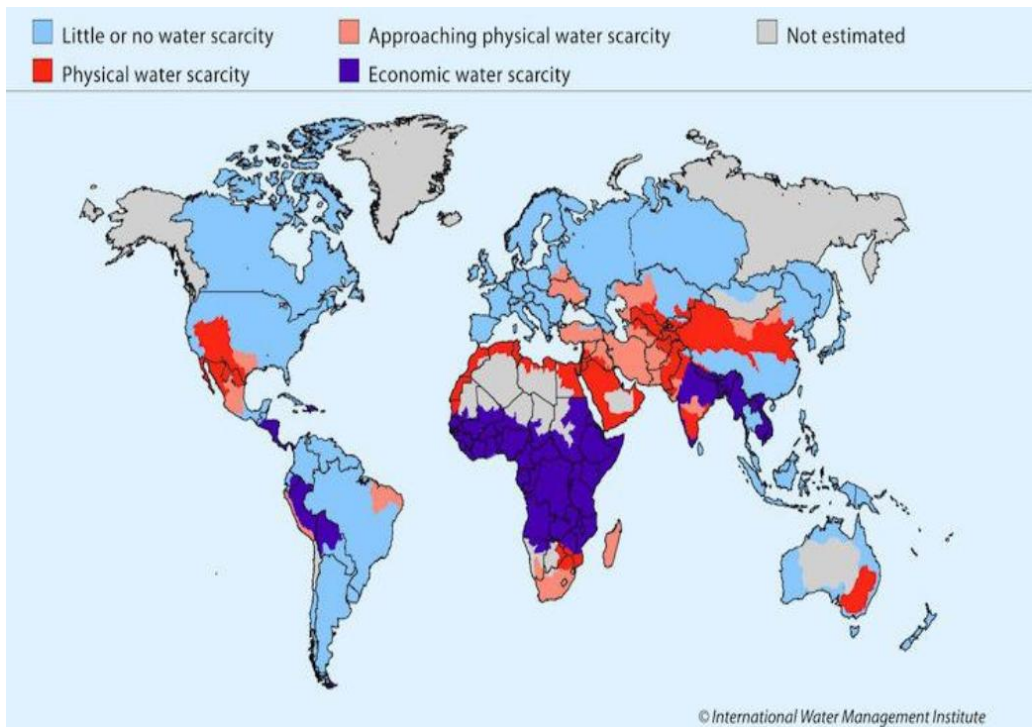


Figure 1. Global water problem in the world

In the Southern Mediterranean, from Morocco to Syria, there is a real problem of "physical scarcity" because demand already represents 105% of the resource (total runoff)!

In West Africa, however, scarcity is only "economic": due to a lack of investment, only 3% of the renewable resource is being utilized (13 out of 387 km³/year; Source: Sahara and Sahel Observatory, COP 21).

On the northern shore of the Mediterranean, from Portugal to Turkey, this rate is 13%, and in France, a country with numerous water towers, the total consumed (all uses) represents only 3% of annual runoff (5.35/175 km³/year). Our country, which is not sufficiently aware of this, is therefore very The situations in these three main types of regions (physical scarcity, economic scarcity, abundance) are therefore not at all the same.

One consequence of the poor geographical distribution of resources (land, water, institutional and financial capacity) is the very strong growth in food dependencies (Africa, the Middle East, Asia) and therefore in international trade. privileged.

The situations in these three main types of regions (physical scarcity, economic scarcity, abundance) are therefore not at all the same. One consequence of the poor geographical distribution of resources (land, water, institutional

and financial capacity) is the very strong growth in food dependencies (Africa, the Middle East, Asia) and therefore in international trade.

The bad news is that South Asia (primarily due to a lack of land and sometimes water), North Africa and the Middle East (due to a lack of water), and sub-Saharan Africa (due to a lack of investment in water infrastructure and agricultural development) have become extraordinarily dependent on imports. Yet, Africa, which is only 14 km from Europe, will gain another billion inhabitants by 2050, and agricultural and food forecasts predict a risk of more than a tripling of production deficits! This is unprecedented. We must therefore expect an explosion in foreign trade (as resource-rich countries will have to produce more to secure supplies) and/or large-scale migration and instability.

The other bad news is that the EU, after regaining its food independence in the 1990s, thanks in particular to the CAP, has also been experiencing ever-increasing deficits ever since! France is somewhat of an exception because it exports the equivalent of 5 million hectares of cereals, which allows it to make a significant contribution to securing wheat imports for the Maghreb and Egypt, and therefore stability. But for how long can it do this, given that our country has lost 2 million hectares of excellent farmland in just 30 years, an area that corresponds exactly to the increase in developed land (largely due to urban sprawl)?

Experts are careful to note distinctions between green infrastructure and green building, as the terms are often confused and inaccurately used interchangeably. Green building refers to the certifications offered by organizations such as Leadership in Environment, Energy, and Design (LEED) for structures that conform to elevated energy efficiency standards. LEED ratings are endorsed by agencies such as the US Green Building Council, and now also extend to neighborhood development. As understood by the EPA, urban planners, and ecodevelopment professionals, green infrastructure refers exclusively to individual, municipal, and regional resource management systems for dealing specifically with stormwater and wastewater.

As the EPA notes, green infrastructure can exist across multiple scales, ranging from what it calls individualized “urban scales” to neighborhood scales and larger citywide or regional scales. At the individual level, green infrastructure includes basic interventions that have a long history of established use; examples include using barrels to collect rainwater for household use, adding trees to streets, and remediating abandoned or underused properties with landscaped elements. Green infrastructure at the neighborhood scale involves engineered solutions with community-level impacts, such as creating a multi-acre green space within an urban district, planting low-elevation rain gardens to absorb rainwater runoff from building roofs and graded properties, and creating artificial wetlands to serve subdivisions or housing complexes by harvesting rainwater resources and supporting localized biodiversity. Scaled up to the citywide or regional level, green infrastructure includes networked groups of localized projects that combine to improve air quality, boost the resilience of water resources, and protect against flooding while making outdoor recreation options more plentiful and accessible.

The EPA lists multiple technologies and systems that can be used in green infrastructure, which can be grouped into broad categories including stormwater management, construction and landscape architecture, building materials, and land use strategies. Each category contains interventions with applications at the urban, neighborhood, citywide, and regional levels. Stormwater management techniques comprise downspout disconnection, rainwater harvesting, rain gardens, and planter boxes. Major examples of construction and landscape architecture-based approaches to green infrastructure include bioswales, green parking areas, green roofs, and green streets. Permeable pavements represent a widely used green infrastructure building material, while land use strategies incorporate urban tree canopies and various land management policies and practices.

Downspout disconnection can be carried out at the homeowner level. It involves reconfiguring rooftop drainage systems to empty stormwater into storage vessels, gardens, or other permeable areas. When applied at the neighborhood or citywide level, it can dramatically reduce the amount of water handled by existing gray infrastructure, thus helping extend its lifespan and reduce maintenance and replacement costs.

Rainwater harvesting takes a broader, upscaled approach to stormwater collection. In addition to the localized techniques that apply to downspout disconnection, rainwater harvesting also includes constructing pits and aquifers capable of storing large fluid volumes. Some systems also use nets and other technologies to capture and extract moisture from fog and dew.

Rain gardens, also known as bioretention cells, are small, localized plant collections created in low-lying areas that are surrounded by graded slopes or other drainage systems. They route stormwater into the garden, hydrating plants and helping prevent water from pooling on driveways, sidewalks, and other surfaces. When rain gardens are situated in densely developed urban areas and surrounded by vertical walls, they are called planter boxes.

Bioswales are features built into road infrastructure, such as gutters, curbs, and parking lots. They use dense volumes of plants and/or mulch, which reduce the speed at which stormwater can flow while also filtering incoming water. Bioswales reduce gray infrastructure workloads and help prevent systems from becoming inundated when major storms occur. Green parking strategies incorporate bioswales, rain gardens, planter boxes, and other green infrastructure technologies into surface parking lots, creating walkability improvements while mitigating the so-called “heat island effect” that links human activity with higher localized ambient temperatures.

Green roofs continue to emerge as an increasingly prominent feature of urban spaces. These architectural features reimagine conventional rooftops as green spaces, covering them with vegetation that supports the evapotranspiration of collected stormwater and the infiltration of incoming rainwater. Green roofs can also be configured as produce-yielding gardens, and they have become particularly popular in major metropolitan centers where the cost of remediating damage caused by excess stormwater is likely to be very high. Similar concepts can be applied in cities at ground level, creating what are widely known as green streets.

Permeable pavement represents a critically important green infrastructure material, as it has mass-scale applications. It includes any type of concrete, asphalt, or interlocking bricks capable of allowing water to pass through, and can be used to finish any flat surface in a developed area. Urban planners make extensive use of permeable pavement materials in high-value areas where flooding, ice, and meltwater volumes pose significant property damage risks.

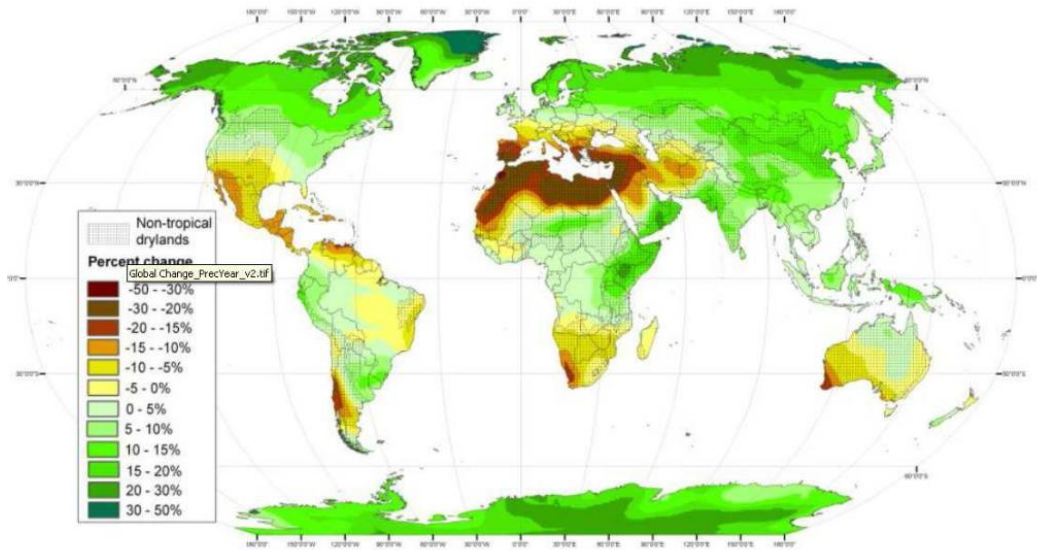
Developers can engineer urban tree canopies to improve localized vegetation density and dramatically accelerate the surrounding environment's ability to absorb rainwater in their branches and leaves. Because trees filter carbon dioxide and other impurities out of the air, they can also yield significant air quality improvements when constructed on a mass scale. Conservationist approaches to land management and urban development have similar impacts, especially in cities surrounded by hills, natural wetlands, flood plains, and streambanks.

Blue-Green Infrastructure extends the concept of green infrastructure to engineered systems that connect with natural landscapes and bodies of water. It can also include artificially constructed supplementary resources such as canals and water treatment facilities to create a municipal water management system that closely replicates the structure and function of natural water cycles. Blue-green infrastructure represents a more complete and integrated approach and holds the potential to improve ecosystem service delivery beyond what green infrastructure or green-gray infrastructure could achieve independently. Its potential benefits include natural reductions in localized air pollution, turnkey irrigation systems for parks and outdoor recreation areas, and more plentiful and resilient access to drinking water supplies.

Cities in the United States and around the world are adopting green and blue-green infrastructure strategies at increasing rates. US municipalities with major green and blue-green infrastructure developments include San Francisco, New York, and Los Angeles. Internationally, ten EU cities launched a joint blue-green infrastructure pilot project in 2021, with municipalities in Belgium, Germany, the Netherlands, Norway, Sweden, and the United Kingdom launching a combined thirty-four programs with a total financial value estimated at €347 million (US \$392 million).

Green blue infrastructure enhancements do not have to be limited to buildings or solid infrastructure. There can be a significant return on investment when these efforts are turned to urban water sources. For example, many urban areas have rivers and lakes within their confines, as well as wetlands and engineered greening. When projects are undertaken to improve water quality, availability, and biodiversity, human populations benefit from the increased green spaces and reduced waterborne diseases. These projects can also reduce ever-rising heat indexes in cities that are increasingly making urban areas less habitable. The most efficient air cooling projects of this type include botanical gardens, wetlands, green walls, street trees, and vegetated balconies.

However, the very bad news is that climate change poses a serious threat to agriculture and food security, especially since many agricultural systems are already degraded by erosion or threatened by the overexploitation of groundwater (significant locally in India, Iran, Mexico, the Southern and Eastern Mediterranean, and the Western United States), by salinization, or by rural poverty. The most threatened regions (South Asia, Africa, the Southern Mediterranean, and the Middle East) are precisely those where the food trade deficit is already the largest! West Africa and the Southern Mediterranean are in an even more critical situation, as sharp declines in rainfall and runoff (up to 30 or 40% over a century) are predicted (and have already been partially observed), and rising temperatures are changing the agricultural landscape (land is losing its agricultural potential and is only suitable for livestock production) and having a very negative impact on yields (Figure 2).



Relative change of mean annual precipitation 1980/1999 to 2080/2099, scenario A1b, average of 21 GCMs (compiled by GIS Unit ICARDA, based on partial maps in Christensen et al., 2007)

Figure 2. Climate change: Relative change in mean annual precipitation (1980/1999 to 2080/2099)

With droughts, declining agricultural productivity, lack of access to irrigation water, and population growth, the risk is therefore that of failed states and large-scale migration and instability. International reports also warn of the risk of a sharp increase in the number of undernourished people worldwide (600 million more than the 800 million already recorded). The issue of the water/land/agriculture relationship and that of rural development are therefore of paramount geopolitical importance.

The essential challenge facing the world today is to better manage resources and achieve sustainable agricultural intensification to ensure both food and water security, adaptation, and mitigation. This involves securing production systems, transitioning to sustainable systems everywhere, increasing production, particularly to secure the rapidly growing supplies of countries lacking water and/or land, and improving access and incomes for the most vulnerable (small-scale farmers).

The good news is that by managing water and soil better, it is often possible to simultaneously: i) improve production and income (by improving water productivity), ii) achieve successful adaptation, and iii) make a decisive contribution to mitigation. Thanks to photosynthesis, we can transform our fields into much better "carbon pumps," meaning we can absorb some of the excess carbon in the atmosphere as CO₂ and simultaneously store carbon in the soil as organic matter, while also producing more and better crops.

This is the crux of agroecology and the "4 per 1000: Soils for Food Security and Climate" initiative, launched at COP 21. The figure "4/1000" represents the increase in carbon stocks in topsoil that would offset all anthropogenic CO₂ emissions. The IPCC's work shows that the technical potential is high and that restoring degraded land must become a true global priority.

Sustainable Blue-Green Infrastructure (BGI) is an integrated planning approach that combines natural, semi-natural, and engineered systems to manage urban water, enhance ecological resilience, and improve human well-being. It pairs "blue" elements (water bodies, wetlands) with "green" spaces (parks, green roofs) to provide multifunctional solutions. Reducing vulnerability and exposure to present climate variability is the first step towards adaptation to future climate change. Flooding and extreme events will become more prevalent under climate change, and only sustainable approaches such as Blue-Green Infrastructure (BGI) will save us from ourselves. Strategies such as BGI that include actions with co-benefits for other objectives can increase resilience across a range of possible future climates while helping to improve human health, social and economic wellbeing, environmental quality, and livelihoods

4. BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE AS A SOLUTION UNDERPINNING SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Blue-Green Infrastructure (BGI), as an umbrella notion, is closely related to the concept of “green infrastructure” - a landscape planning concept that is allied to other planning concepts such as green-ways (ahern, 1995; fábos and ryan, 2006) and ecological networks (jongman and pungetti, 2004). Since 2000, green infrastructure has primarily been introduced to design and promote urban green bodies as a coherent environmental planning system (sandström, 2002; thomas and littlewood, 2010). It can be considered to include all artificial, natural, and semi-natural components of multifunctional environmental systems around, within, and between urban areas. The increasing popularity of green infrastructure applications in various regions of the world underscores its multitude of benefits (benedict and mcmahon, 2006; gill et al., 2007; mell, 2008; tzoulas et al., 2007). Green infrastructure highlights the quantity and quality of regional, periurban, and urban green bodies; their multifunctional impact; and the significance of connections between habitats (ryn and cowan, 2013). It has also been argued that the ecosystem services offered by green infrastructure can secure healthy environments and health improvements, including physical and mental health, to the people residing within or in close proximity to it (tzoulas et al., 2007). Encompassing all these aspects, the comprehensive definition put forward by benedict and mcmahon (benedict and mcmahon, 2002) is: “green infrastructure is an interconnected network of waterways, wetlands, wildlife habitats, and other natural areas; greenways, parks, and other conservation lands; working farms, ranches, and forests; and wilderness and other open spaces that support species, maintain natural ecological processes, sustain air and water resources, and contribute to the health and quality of life for (american) communities and people” (mell, 2008). Furthermore, the contribution of (blue-) green infrastructure to climate change adaptation has begun to be documented (gill et al., 2007; Kazmierczak and carter, 2010), yet there are few studies that have so far systematically focused on this aspect.

BGI can exist at various geographic levels (e.g. re- gion, city-region, urban, river basin/ catch- ment/watershed, and site) and functions across jurisdictional boundaries. Therefore, BGI is not limited to urban spaces, and its planning can be considered at multiple levels and in various planning contexts such as urban, peri-urban, regional, and rural planning. BGI is significantly different from conventional “hard” built infrastructures such as roads, sewerage and drainage systems, and utility lines. Connectivity is a key concept for BGI, since many of the bene- fits of BGI can only be truly realized by an inter- connected network of its constituting compo- nents (Faggian and Sposito, 2009; Faggian et al., 2012).

BGI is an important means of dealing with flood- ing/extreme weather since it can consist of a net- work of interconnected water reservoirs, wet- lands, and their associated (natural) open spaces developed along rivers, which serve several in- terrelated purposes including: (i) water storage, especially for agriculture’s irrigation and indus- try use; (ii) regulators of the river system, partic- ularly the prevention of floods during extreme rainfall events; (iii) habitat for plants and animal wild life (nature conservation); (iv) a cleaning system of polluted water, particularly absorbing fertilizers that are often washed away from farmland and which tend to cause algae blooms in rivers and lakes; (v) areas for the growth of wetland crops, such as reed, for second genera- tion biofuel production; and (vi) zones for the pursuit of suitable recreational activities (Benedict and McMahon, 2006; Kazmierczak and Carter, 2010; Koomen et al., 2012; Mell, 2008).

The number of BGI projects that have been suc- cessfully carried out or are still under develop- ment is relatively small, but this number will in- crease in the future. Despite its great promise, there are a number of obstacles preventing the wide-scale uptake of the BGI concept. While it is costly to implement BGI, the expense is quickly recovered through avoided damage at the first flood and easily justified through the multiple benefits that accrue. In some parts of the world, such as in The Netherlands, BGI is well accepted; but the concept has not been as widely imple- mented elsewhere due to a general lack of awareness (Thorne et al., 2015).

The most important antecedent to BGI is the ex- tensive spatial planning work and research un- dertaken in The Netherlands over many decades. In particular, climate change impacts on flooding are especially relevant in the Netherlands where about 25% of the land is below mean sea level and over 50% of the country is being protected from flooding by embankments (Koomen et al., 2012; Snepvangers et al., 2011; Sposito et al., 2014; Verburg et al., 2012). More broadly, it has been argued that:

“Drastic changes are expected in land-use pat- terns as a result of socioeconomic developments and climate change. Biodiversity and other land- use functions require larger areas for adaptation to changes in climatic conditions and thus in- crease competition for available space. This requires a different, more multi-functional type of land-use planning and more efficient manage- ment of resources” (Koomen et al., 2012).

Practical examples from The Netherlands of various possible components of BGI that promote functional synergies are illustrated in Figure 3 (Snepvangers et al., 2011).

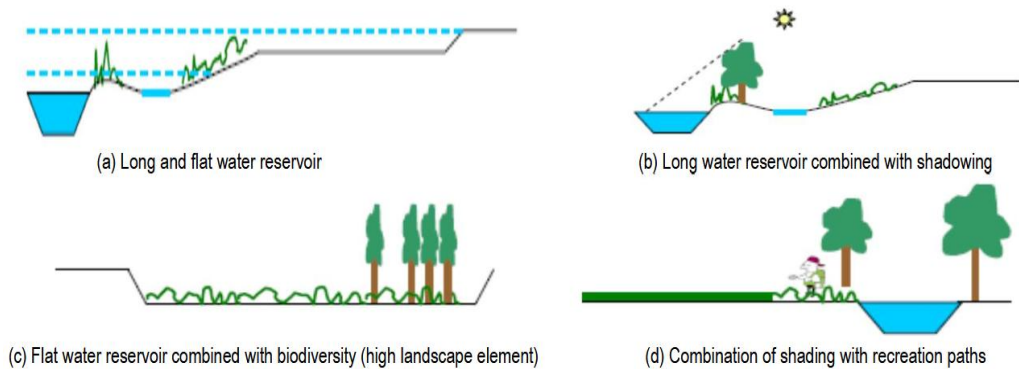


Figure 3: Practical examples from the Netherlands of various possible components of bgi (snepvangers et al., 2011)

Figure 3 (a) shows a long and flat reservoir, which allows for a highly flexible system to store water at different levels. This BGI component can be ecologically managed to develop a large natural area along the watercourse, so improvements in water quality can be secured. The larger area has the capacity to soak up much more of the nutrient and sediment load than the animals and plants in the stream channel, which can be overwhelmed at the time of heavy rainfalls. Therefore, it can improve the water quality. Moreover, wetlands take a while to fill and empty during a flood, so they help decrease the size of floods for downstream areas (Snepvangers et al., 2011).

Figure 3 (b) shows a long water reservoir combined with shadowing along the river banks. If the banks are designed with attention to dynamic changes, water quality improvements can be secured. For instance, dynamic changes can be obtained by planting suitable trees (river trees) that project shadows to the watercourse. Shadows aid significantly in keeping watercourse temperature cool. Catchment organisms desire their watercourse to be shaded. Warmer water can't carry as much dissolved oxygen, and this will lead to water quality decline and death for some organisms that can't survive in these situations. Tree planting also helps to stabilize the bank and reduce erosion and reinstate the natural habitat. It also prevents excess soil and nutrients from getting into the watershed and will improve the quality of the water.

Figure 3(c) shows the combination of a flat-water reservoir that can be enhanced by marshy forests (wetlands) and a rich plant growth at a low level to attract birds and animal species.

Figure 3 (d) shows shading that has been secured through high landscape elements (trees) along a watercourse, which adds variety as well as interesting resting places for people pursuing recreational activities (Snepvangers et al., 2011).

A sample of the first two classifications of BGI components is summarized in table 1 (Cruijsen, 2015).

Table 1 Classification of bgi components based on their contribution to flooding mitigation and their position (Cruijsen, 2015)

	Surface	Sub-surface	Aboveground
Infiltration retention	parks and forests, permeable pavement, storm water flow-through planters, storm water trees, bio retention garden, bio retention swales, regional agriculture	subsurface storage with retention capacity	green facades, green roofs, trees
Storage retention	regional wetland, retention storage basins, seasonal storage and rainwater harvesting		rainwater tanks
Detention	surface detention ponds, water square	subsurface storage tanks	blue roofs

CONCLUSION

To address the immense challenges ahead, solutions exist and two major new trends are emerging internationally. The first trend is the growing awareness of the new strategic importance of water storage and irrigation, and the renewed interest in agricultural water management. This represents a reversal of the trend, because since the 1980s, in developed countries of the Global North (Spain being an exception), agricultural water management had a bad reputation, to the point that major international donors were no longer willing to finance investments in the Global South. This reversal is particularly evident in sub-Saharan Africa, as the continent has water resources, and the current low irrigation rate (5%) exacerbates its vulnerability and prevents it from meeting the dual challenge of food security and climate change.

Moreover, in many cases, the development of irrigation has given young people new opportunities, lifted them out of poverty, and halted emigration. It thus contributes to preserving major balances, particularly the urban-rural balance. Recent statements from donors confirm this trend.

Climate change is also a factor. Warming has the effect of significantly increasing potential evapotranspiration (already +15 to 20% in France), resulting in longer and more severe low-water periods and increased water needs for agriculture. The latest IPCC report (2014) therefore estimated that \$225 billion in investments in storage and irrigation will be needed by 2030 simply to maintain the services currently provided by water in 200 countries. Its chapter on Europe shows that the relationship between water and agriculture will become a central concern for the continent. It calls for the creation of new hydraulic infrastructure to meet the new low-water needs and prevent conflicts.

The second fundamental trend is to improve water productivity through more efficient resource management and agronomic innovation. Significant progress has already been achieved in terms of efficiency (reduced losses in transport and at the plot level), thanks in particular to precision irrigation. While further progress is still possible, including in arid regions (see ICARDA's work), it should not be overestimated. What is new and important for the future is a return to agronomy, a holistic approach to water and soil (landscapes), and a commitment to the agro-ecological transition. By changing agronomic practices, utilizing crop rotations, and revitalizing soils, we can indeed reduce evaporation losses and significantly improve water productivity in rainfed and irrigated crops, but also: i) increase water retention in soils and the stock of organic carbon, ii) improve infiltration and groundwater recharge, and iii) reduce runoff losses and therefore also the risk of flooding.

Farmers, provided they have access to water and commit to agroecology, can therefore become key players in sustainable development. This is particularly crucial for rainfed crops, which are often overlooked in development efforts, despite the fact that they constitute the majority of agricultural land and support the farming population, and that their development can lead to significant environmental and socio-economic gains, including for the benefit of water resources and their downstream users.

We must therefore learn to think in terms of the "blue water - green water continuum" and seek ways to create synergy that intelligently combines productivity, ecosystems, and sustainability.

What ultimately emerges is the new strategic importance of "water storage" within a broader vision, that of a continuum that can draw on various options including: large and small dams, reservoirs, and cisterns; artificial recharge of aquifers; water storage/retention in soils (agroecology); and storage through proper preservation, creation, and management of wetlands. It is up to each region to develop the appropriate planning and management solution.

Success requires acting on all levers simultaneously (not pitting solutions against each other). It calls for both an evolution in the relationship between agriculture, water, and soil, and also an evolution in society's perceptions of water, agriculture, and the environment, as well as in policies, planning, and management.

The mistake would be to focus solely on agroecology and efficiency and neglect agricultural hydraulics, and vice versa. While climate change threatens stability, the worst thing would be to remain entrenched in dogmatic and rigid positions that will prevent us from anticipating and addressing local and global challenges related to adaptation/mitigation, food security, and employment.

If agriculture must commit to the agro-ecological transition, society must understand the new strategic importance of agriculture/food and water and carbon storage. Water policies, too often focused solely on supply (in the Global South) or, conversely, solely on demand (in the Global North), will therefore have to learn to combine supply and demand to take into account climate and food challenges and respond to the new needs of low water levels (agriculture and ecosystems).

Agriculture is not an economic activity like any other, and it cannot remain a mere variable for adjusting environmental policies or urban development. The right to food is a universal right that must be guaranteed if we are to maintain stability. Water and agricultural policies must therefore become genuine sustainable development policies.

Since each context is different, it is up to each territory to define and develop its own project, taking into account not only local issues but also global ones (climate and food security). More than ever, we therefore need to learn to think and act together, “locally” and “globally”.

Références

- [1] Alphanhéry P. et al., 2012, " Les données entre normalisation et territoire : la construction de la trame verte et bleue ", Développement durable et territoire, Vol.3, No.2, [en ligne] Juillet 2012, URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/9282>
- [2] Alves, J.P. Gómez, Z. Vojinovic, A. Sánchez, S. Weesakul. Combining co-benefits and stakeholders' perceptions into green infrastructure selection for flood risk reduction. *Environments*, 5 (2) (2018), pp. 29-123
- [3] Amsellem J., Deshayes M., Bonneval M., 2010, "Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales", *Sciences eaux & territoire, la revue d'Irstea*, No.03, 40-45. DOI : 10.3917/set.003.0040
- [4] Arnould P., et al., 2011, "La nature en ville : l'improbable biodiversité ", *Géographie, économie, société*. Vol.13, No.1, 45-68.
- [5] Benedict, M. A. and McMahon, E. T. (2002), "Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century", *Renewable Resources*, 20(3):12–17
- [6] Benedict, M. A. and McMahon, E. T. (2006), "Green Infrastructure: Linking Landscape and Communities", Island Press
- [7] Bennett G., 1991, *Vers un réseau écologique européen*, Arnhem, Institut pour une Politique Européenne de l'Environnement.
- [8] Burel F., Baudry J., 1999, *Ecologie du paysage, concepts, méthodes et applications*, Paris, Tec & Doc.
- [9] Calabrese J.M., Fagan W.F. 2004, "A comparison-shopper's guide to connectivity metrics", *Front. Ecol. Environ*, Vol.2, 529-536. DOI : 10.1890/1540-9295(2004)002[0529:ACGTCM]2.0.CO;2
- [10] Clergeau P., Désiré G., 1999, "Biodiversité, paysage et aménagement : du corridor à la zone de connexion biologique", *Mappemonde*, No.55, 19-23.
- [11] Cruijsen, A. (2015), "Design opportunities for flash flood reduction by improving the quality of the living environment: A Hoboken City case study of environmental driven urban water management" PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology
- [12] E. Lawson, C. Thorne, S. Ahilan, D. Allen, S. Arthur, G. Everett, ..., N. Wright. Delivering and evaluating the multiple flood risk benefits in blue-green cities: an interdisciplinary approach D. Proverbs, C.A. Brebbia (Eds.), *Flood recovery innovation and response IV*, WIT Press, Southampton (2014) *Environment & Sustainability*, 6 (1) (2017), pp. 15-36
- [13] Faggian, R. and Sposito, V. (2009), "Systemic regional development - a system thinking approach", In *Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the ISSS*
- [14] Faggian, R., Romeijn, H., and Sposito, V. (2012), "Soil data necessary for land suitability assessments in the Gippsland region", Technical report, Agriculture Victoria Services Pty. Ltd., Melbourne
- [15] Fu W., et al., 2010, "Characterizing the "fragmentation-barrier" effect of road networks on landscape connectivity: A case study in Xishuangbanna, Southwest China", *Landscape and Urban Planning*, 122-129. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2009.12.009
- [16] Ghofrani, Z., V. Sposito, V., R. Faggian, R. 2017. A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts
- [17] Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., and Pauleit, S. (2007), "Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure", *Built Environment*, 33(1):115–133
- [18] Girardet X., Foltête J.-C., Clauzel C., 2013 "Designing a graph-based approach to landscape ecological assessment of linear infrastructures ", *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.42, 10-17. DOI : 10.1016/j.eiar.2013.03.004
- [19] Gledhill and James, 2008. Rethinking urban blue spaces from a landscape perspective: Species, scale and the human element. *Salzburger Geographische Arbeiten*, 42 (2008), pp. 151-164
- [20] Holling, C. S. (1973), "Resilience and stability of ecological systems", *Annual Review of Ecology and Systematics*, pages 1–23
- [21] J. Abbott, P. Davies, P. Simkins, C. Morgan, D. Levin, P. Robinson. *Creating water sensitive places – Scoping the potential for water sensitive urban design in the UK*. CIRIA, London (2013)
- [22] J. Hoyer, W. Dickhaut, L. Kronwitter, B. Weber. *Water sensitive urban design: Principles and inspiration for sustainable stormwater management in the city of the future*. Jovis, Berlin (2011)
- [23] J. Hoyer, W. Dickhaut, L. Kronwitter, B. Weber. *Water sensitive urban design: Principles and inspiration for sustainable stormwater management in the city of the future*. Jovis, Berlin (2011)
- [24] Janin A., 2011, *Evaluer la connectivité en paysage fragmenté : de l'écologie comportementale à la biologie de la conservation*. Sciences agricoles. Université Claude Bernard - Lyon I, [En ligne]. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00937294/document>
- [25] Jongman, R. H. G. and Pungetti, G. (2004), "Ecological networks and greenways: concept, design, implementation", Cambridge University Press

- [26] Koomen, E., de Moel, H., Steingröver, E. G., van Rooij, S. A. M., and van Eupen, M. (2012), "Land use and climate change", Technical re- port, National Research Programme Climate Changes Spatial Planning
- [27] Lambeck R.J., 1997, "Focal species: a multi-species umbrella for nature conservation", Conservation Biology, Vol.11, 849–856. DOI : 10.1046/j.1523-1739.1997.96319.x
- [28] Mell, I. C. (2008), "Green infrastructure: concepts and planning", In FORUM ejournal, pages 69– 80
- [29] Ritchie L.E., Betts M.G., Forbes G., Vernes K., 2009. "Effects of landscape composition and configuration on northern flying squirrels in a forest mosaic", Forest Ecology and Management, Vol.257, 1920-1929.DOI : 10.1016/j.foreco.2009.01.028
- [30] Selman, P. 2008. What do we mean by sustainable landscape? Sustainability: Science Practice and Policy, 4 (2) (2008), pp. 23-28
- [31] Snepvangers, J., Kamerling-Baake, A., Rooij, S. A. M. v., and Steingröver, E. G. (2011), "Plannen met multifunctionele groenblauwe netwerken in Salland", Technical report, Ecologische Netwerken
- [32] Sposito, V., Faggian, R., Diogo, V., and Romeijn, H. (2014), "Blue-green infrastructure for creat- ing resilient regions, a case study in the Gipps- land Region, Victoria, Australia", Technical re- port, Deakin University
- [33] T.H.F. Wong, M.L. Eadie. Water sensitive urban design: A paradigm shift in urban design. 10th World Water Congress, International Water Resources Association, Melbourne, Vic., Australia (2000)
- [34] Taylor P.D., et al., 1993, "Connectivity is a vital element of landscape structure", Oikos, Vol.68, No.3, 571-573.DOI : 10.2307/3544927
- [35] Thomas, K. and Littlewood, S. (2010), "From green belts to green infrastructure? The evo- lution of a new concept in the emerging soft governance of spatial strategies", Planning, Practice & Research, 25(2):203–222
- [36] Thorne, C., Lawson, E., Ozawa, C., Hamlin, S., and Smith, L. (2015), "Overcoming uncertainty and barriers to adoption of blue-green infra- structure for urban flood risk management", Journal of Flood Risk Management
- [37] Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kazmierczak, A., Niemela, J., and James, P. (2007), "Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastruc- ture: A literature review", Landscape and ur- ban planning, 81(3):167–178
- [38] V. Shandas, A. Nelson, C. Arendes, C. Cibor. Tabor to the river: An evaluation of outreach efforts and opportunities for engaging residents in stormwater management, Paper 78. Portland State University, Portland, OR (2010). <https://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://>
- [39] Van der Ryn, S. and Cowan, S. (2013), "Ecological design", Island Press
- [40] Vanpeene-Bhuijs S. et Amsallem, J., 2014, "Schémas régionaux de cohérence écologique : les questionnements, les méthodes d'identification utilisées, les lacunes", Sciences Eaux & Territoires, No.14, 2-5.
- [41] Verburg, P. H., Koomen, E., Hilferink, M., Pérez- Soba, M., and Lesschen, J. P. (2012), "An as- sessment of the impact of climate adaptation measures to reduce flood risk on ecosystem services", Landscape Ecology, 27(4):473–486
- [42] Y. Jiang, C. Zevenbergen, Y. Ma. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. Environmental Science & Policy, 80 (2018), pp. 132-143

Drought Intensification and Hydrological Regime Shifts in Tunisia's Medjerda High Valley

Wahida Matoussi¹, Sahar Abidi¹

¹Laboratoire Des Ressources Sylvo-Pastorales, Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka, University of Jendouba, Tabarka, Tunisia,

Abstract

This study examines the influence of drought on hydrological regimes in Tunisia's Medjerda High Valley during 43 years (1980–2023). The methodology involved analyzing homogeneity using the Pettitt, Buisband, and SNHT tests, the use of correlation analysis and standardized indicators, such as the Streamflow Drought Index (SDI) and the Standardized Precipitation Index (SPI), to identify drought. It has been discovered that droughts have become much more frequent and severe, particularly since 2015. A 50% reduction in streamflow during years of severe drought was directly correlated with lower precipitation, according to hydrological data. Flow quantities at the Ghardimaou station were found to have decreased by 45% from pre-2010 values, and similar magnitude reductions were noted across the basin. These findings highlight how urgent it is to put integrated drought adaptation plans into place in order to protect Tunisia's main supply of water..

Keywords: Drought; SPI, SDI; Rainfall variation; Water Resources, Medjerda High Valley; Tunisia

Intensification de la sécheresse et changements du régime hydrologique dans la haute vallée de Medjerda en Tunisie

Résumé

Cette étude examine l'influence de la sécheresse sur les régimes hydrologiques de la haute vallée de la Medjerda en Tunisie sur une période de 43 ans (1980-2023). La méthodologie employée a consisté à analyser l'homogénéité des données à l'aide des tests de Pettitt, Buisband et SNHT, et à utiliser l'analyse de corrélation et des indicateurs standardisés, tels que l'indice de sécheresse des cours d'eau (SDI) et l'indice de précipitations standardisé (SPI), pour identifier les épisodes de sécheresse. Il a été constaté que les sécheresses sont devenues beaucoup plus fréquentes et sévères, en particulier depuis 2015. Une réduction de 50 % du débit des cours d'eau lors des années de sécheresse sévère a été directement corrélée à une baisse des précipitations, selon les données hydrologiques. Les débits à la station de Ghardimaou ont diminué de 45 % par rapport aux valeurs d'avant 2010, et des réductions d'ampleur similaire ont été observées dans l'ensemble du bassin. Ces résultats soulignent l'urgence de mettre en œuvre des plans intégrés d'adaptation à la sécheresse afin de protéger la principale ressource en eau de la Tunisie.

Mots clés : Sécheresse ; SPI, SDI ; Variation des précipitations ; Ressources en eau, Haute vallée de Medjerda ; Tunisie

¹ Corresponding author: sahar.abidi@uj.rnu.tn

1. INTRODUCTION

Mediterranean water resource management presents a major challenge because the region has variable climates and drought occurrences that directly influence water availability. Tunisia, the Upper Medjerda Valley, becomes increasingly susceptible to these occurrences. This study aims to examine the impact of drought on hydrological regimes to direct water management policy towards sustainability.

Droughts are amongst the most devastating natural disasters with far-reaching impacts on water supplies, agriculture, and economic and social development. IPCC (2021) projects that the nations in the Mediterranean region are likely to be drier and experience longer dry periods under climate change projections. The standardized precipitation index (SPI) and standardized drought index (SDI) are strong tools for quantifying the intensity and duration of drought on various spatial scales (McKee et al., 1993; Wilhite & Glantz, 1985). Vicente-Serrano et al. (2012) demonstrated that the two indices are effective in detecting the onset, severity, and spatial extent of drought events in various climatic zones.

In the Mediterranean, drought frequency and severity have been on the rise, as has been shown through recent research. Trambly et al. (2020) reviewed drought trends across the region in 160 basins, with significant increases in drought severity reported across approximately 70% of the sites being studied. Sousa et al. (2018) also found that drought severity in the southern Mediterranean has risen at approximately twice the rate as that in the north over the past four decades. In Tunisia, Mahdaoui et al. (2018) presented evidence of significant fluctuation in the north watersheds' precipitation, with Kotti et al. (2015) indicating declining trends in annual rainfall in the central regions. Tunisia has been found by Zittis et al. (2021) to be one of the most vulnerable countries in the Mediterranean to deficiency in precipitation, with projections indicating a decrease in annual rainfall by up to 15-20% by the year 2050. The Medjerda Basin, Tunisia's primary source of water, has been the focus of hydrological modeling that indicates significant declines in discharge under various climate projections (Guenouche et al., 2023).

Semi-arid watershed hydrological drought responses have been extensively studied by Lorenzo-Lacruz et al. (2013), who noted that streamflow declines typically exceed the proportional reduction in rainfall due to non-linear watershed processes. Bargaoui et al. (2014) specifically studied these relationships in Tunisia watersheds, with recorded values of streamflow elasticity ranging from 1.5 to 2.3, indicating that a reduction in rainfall by 10% typically leads to a reduction in river discharge by 15-23%. Kingumbi et al. (2016) further demonstrated that repeated drought years impose compounding effects on groundwater-surface water interactions in the aquifer systems in Tunisia, progressively draining base flows and lengthening hydrological recovery periods.

Concerning water management planning, Haddadin (2018) reviewed drought adaptation planning in North Africa, highlighting the need for integrated water resource planning that harmonises agricultural, urban, and environmental water requirements. El Garah et al. (2017) reviewed the efficiency of water-saving technologies in Tunisia, with the water-saving potential recorded at 25-35% through the use of upgraded irrigation systems. Besbes et al. (2019) also reviewed policy mechanisms for water allocation during drought, highlighting the need for robust monitoring systems and tiered response mechanisms.

Besides these notable contributions, the gap in research exists on the effects of structural shifts in climate trends on hydrological regimes, with a focus on the Upper Medjerda Valley.

This work fills the gap by correlating hydrological data with long-term drought indices in a systematic way and applying statistical tests for homogeneity to identify breakpoints in the climatic series. Our specific objectives are to: (1) quantify temporal trends in the frequency and severity of drought using standardized indices; (2) identify structural shifts in the pattern of rainfall; (3) analyze the associated impacts on the regime of the streamflow; and (4) make specific recommendations on sustainable water resource planning.

2. MATERIEL & METHODS

2.1. Study Area

The Medjerda High Valley extends over more than 23,700 km², crossing North Tunisia from Ghardimaou to the Sidi Salem dam (Figure 1). The area has a semi-arid climate with dominant winter rains, with an average annual rainfall ranging from 400-600 mm. Its principal tributaries include the Mellegue, Bouhertma, Tessa, and Kasseb

ivers, which all feed major agricultural production with cereals, olives, and market vegetables. The area also irrigates several urban centers with a combined population of over 1.5 million inhabitants.

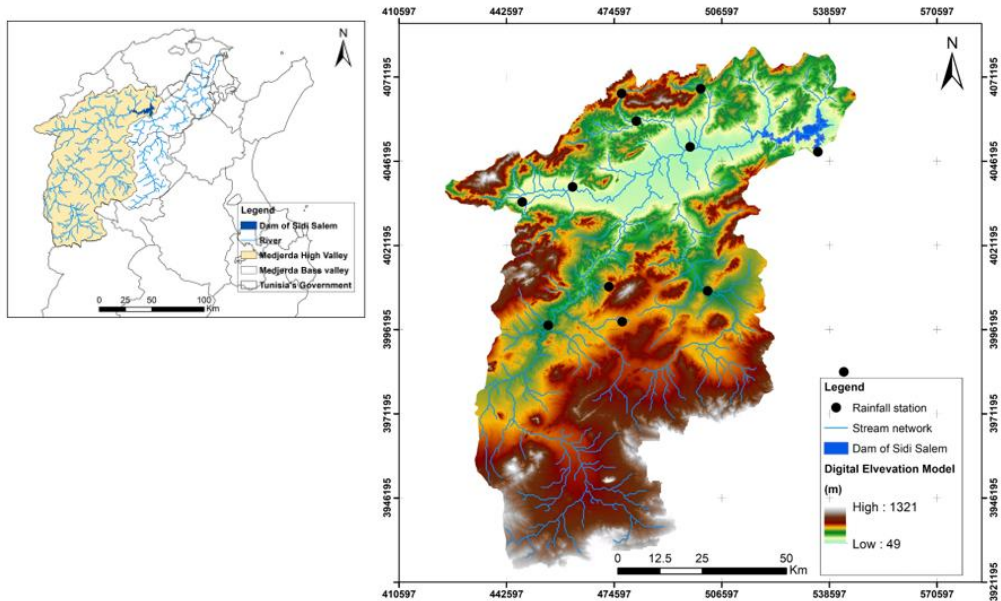


Fig. 1 - Location of the study area in the Medjerda High Valley, Tunisia

2.2. Methodology

The meteorological data were acquired with the aid of 12 rainfall stations (1980-2023) and temperature data provided by the National Institute of Meteorology. In order to cover the watershed as thoroughly as possible, the stations were chosen based on the spatial position and data availability (Figure 1). For the years 2015–2022, hydrological data with daily discharge values were obtained from three major hydrometric stations (Ghardimaou, Jendouba, and Bousalem). Multiple imputation techniques were used to impute missing values in rainfall data, which made up about 7% of the dataset (Teegavarapu & Chandramouli, 2005). In particular, we used k-nearest neighbor algorithms with $k=5$ for intervals longer than three months and weighted distance averaging for gaps up to three months. When cross-validated against known values, our validation techniques yielded an accuracy of over 85%. Every dataset was checked for consistency and completeness, and outliers were assessed using cross-station comparison and interannual variability.

To find structural changes in the rainfall and outflow time series, three complementary homogeneity tests were used:

- The Pettitt Test is a non-parametric technique that uses the highest rank-sum difference before and after possible breakpoints to identify single change sites (Pettitt, 1979).
- Buishand Range Test: This detects changes in the mean in normally distributed data based on the examination of cumulative deviations from the mean (Buishand, 1982), with the significance being determined with Monte Carlo simulations (10,000 iterations).
- SNHT (Standard Normal Homogeneity Test): A likelihood-ratio test that contrasts the means before and after potential change points, with particular robustness for the identification of shifts at the beginning or ending points of time series (Alexandersson, 1986).

In climatological research, these homogeneity tests are frequently employed to identify non-climatic changes in observational data (Costa & Soares, 2009; Wijngaard et al., 2003).

The Standardized Precipitation Index (SPI) was computed based on all 12 stations' monthly rainfall records. Following McKee et al. (1993), we modeled the rainfall data with gamma distributions and standardized these to normal distributions to compute standardized values. SPI was calculated at the 3-, 6-, and 12-month scales, and the values were classified as: normal (>-1.0), moderately dry (-1.0 to -1.5), severely dry (-1.5 to -2.0), and extremely dry (<-2.0).

The Standardized Drought Index (SDI) was calculated using the three hydrometric stations' discharge data following the methodology of Nalbantis & Tsakiris (2009). Monthly discharge volumes were standardized with the same probabilistic technique as SPI, and the meteorological and hydrological drought conditions could be directly compared. SDI values were categorized using the same thresholds as SPI.

To assess lag correlations between meteorological and hydrological manifestations of drought, the Pearson correlation coefficients for SPI and SDI values on different timelines were also calculated, following established approaches for linking meteorological and hydrological drought dimensions (Zhu et al., 2019).

Using packages 'climatol' (v3.1.2) for homogeneity testing (Guijarro, 2018), 'SPEI' (v1.7) for drought index computation (Beguería & Vicente-Serrano, 2017), and 'trend' (v1.1.4) for temporal trend analysis (Pohlert, 2020), all statistical analyses were carried out using R statistical software version 4.1.2. ArcGIS 10.6 was used for spatial mapping and visualization.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

The primary findings of the drought index analysis, homogeneity testing, and hydrological responses noted during the study period are compiled in the sections that follow.

3.1. Homogeneity Testing and Structural Changes

Several tests for homogeneity revealed significant breakpoints in the rainfall regime in the Upper Medjerda Valley. Nine of the twelve rain stations had breakpoints found by the Pettitt test between 2012 and 2015, with the Sidi Salem, Bou Salem, and Jendouba stations demonstrating statistical significance at $p < 0.05$. These results were corroborated by the Buishand Range test, which found comparable breakpoints at the central watershed stations with exceptionally strong signals ($p < 0.01$). These trends were further supported by SNHT data, which showed that test statistics for stations in the eastern watershed were higher than critical levels at the 95% confidence level.

When comparing periods before and after 2013, the Sidi Salem (Figure 2) and Bou Salem stations showed the biggest reductions, with average annual rainfall declining by 18.7% and 22.4%, respectively.

These results confirm that recent declines in precipitation reflect statistically significant structural shifts, rather than short-term anomalies in the climatic system.

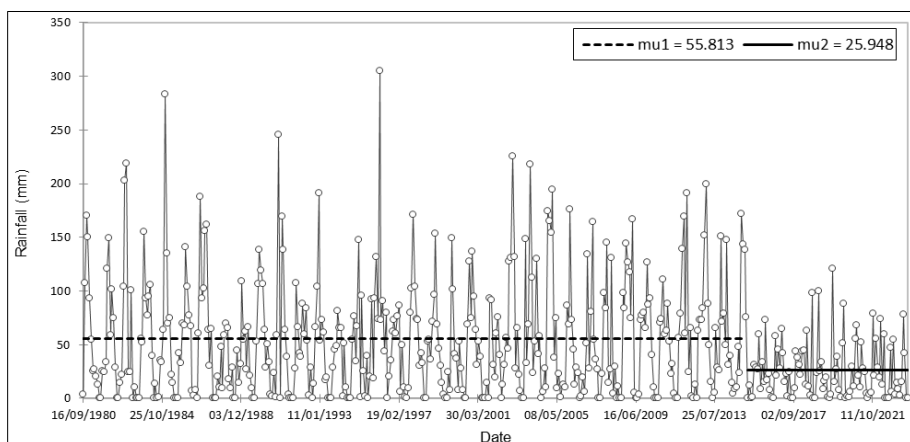


Fig. 2 - Results of the Pettitt homogeneity test for the Sidi Salem rainfall station

3.2. Temporal Trends in Drought Indices

SPI values at the 12 weather stations indicated a marked intensification of drought conditions after 2015. All stations had at least one extreme drought event ($SPI < -2.0$) between 2017 and 2020, according to the 12-month SPI readings, which showed significant severity. The longest drought conditions were observed at the Kef Heliopolis and Barrage Kasseb stations, when SPI values regularly dropped below -1.5 for months in a row (Figure 3). A west-to-east gradient in drought intensity was observed spatially, with slightly milder conditions at western stations than at central and eastern stations. A worsening trend in dry conditions was indicated by the frequency of drought months ($SPI < -1.0$), which increased from an average of 18% during 1980–2000 to 27% during 2000–2015 and then to 34% during 2015–2023.

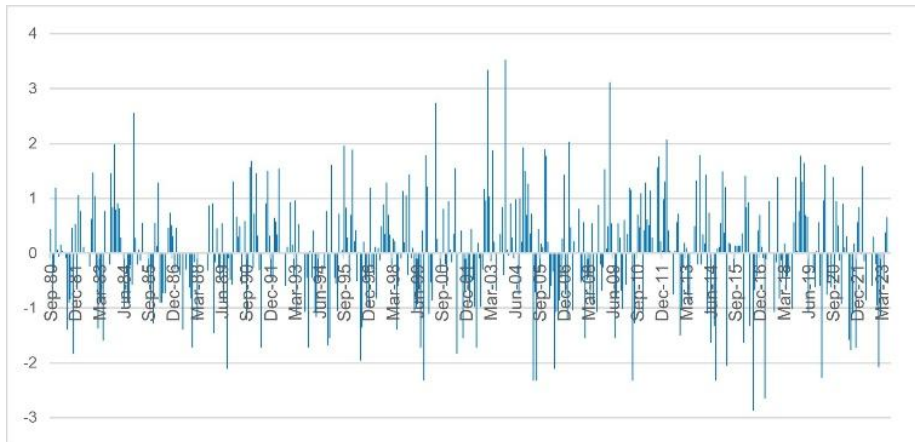


Fig. 3 - Standardized Precipitation Index (SPI) for Kef Heliopolis station throughout time (1980–2023)

3.3. Hydrological Response to Drought

Analysis of hydrological data revealed that streamflow has significantly decreased at every monitoring location. Compared to pre-2010 records, flow flows at Ghardimaou decreased by almost 45% between 2015 and 2022. The Jendouba (41.3%) and Bousalem (48.7%) stations showed comparable declines (Figure 4). Strong Pearson correlations between the 6-month SPI values and the SDI values computed for these stations ($r = 0.78, 0.81$, and 0.76 for Ghardimaou, Jendouba, and Bousalem, respectively) suggested a quick hydrological response to meteorological drought.

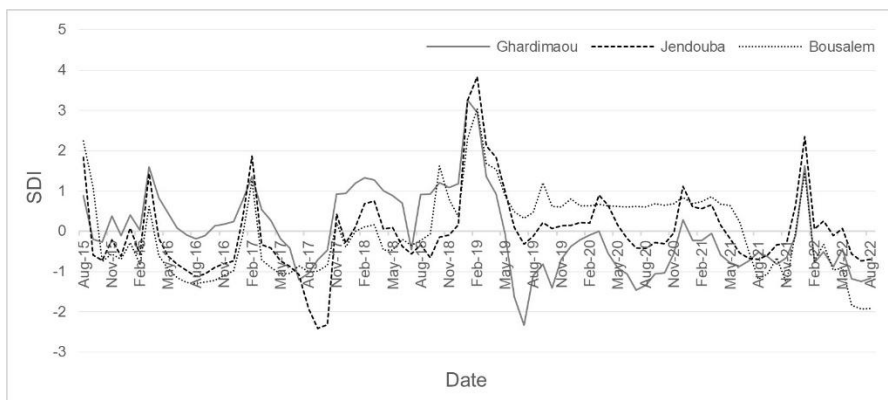


Fig. 4 - Standardized Drought Index (SDI) for the hydrometric stations (2015–2022)

The correlation analysis (Figure 5) demonstrates the strong relationship between SPI and SDI among the three hydrometric stations, hence validating the watershed's limited flow buffering capacity and high susceptibility to precipitation variability. Notable variations were also seen in the monthly flow distribution patterns, with base flows declining by roughly 35% during the summer months (June-September) and peak flows declining by up to 63% during the winter months (December-February). The agricultural water supply faces significant issues as a result of these periodic changes, especially when it comes to satisfying summer irrigation demands.

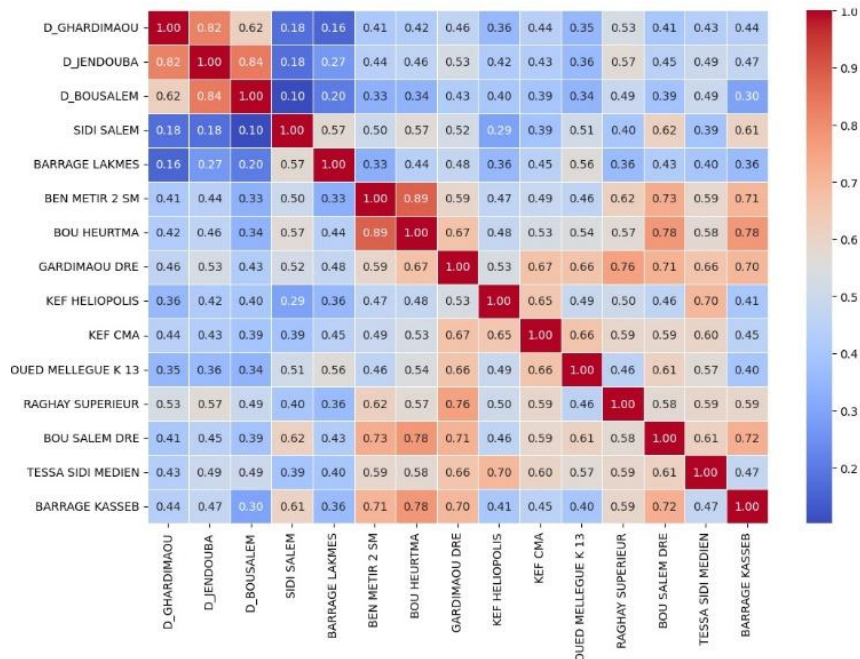


Fig. 5 - Pearson correlation matrix between the Streamflow Drought Index (SDI) and the Standardized Precipitation Index (SPI) across Medjerda watershed stations (2015–2022)

3.4. Discussion

The observed structural shifts in rainfall and streamflow have direct implications for sustainable water management and regional planning. The finding of statistically significant breakpoints in precipitation patterns between 2013 and 2015 is consistent with broader regional studies across the Mediterranean basin. Lionello et al. (2018) found similar transition sites in rainfall regimes across southern Europe and North Africa, attributed to shifting atmospheric circulation patterns and sea surface temperature anomalies. The study reveals a considerable association between SPI and SDI values ($r > 0.75$), indicating that this semi-arid watershed is particularly vulnerable to precipitation changes. This sensitivity exceeds that reported by similar investigations in more humid Mediterranean watersheds, where Guenouche et al. (2023) discovered correlations ranging from 0.65 to 0.70. The approximately 45% reduction in streamflow caused by drought intensification constitutes a significant hydrological change, above the 30-35% reductions predicted by earlier modeling studies for the region (Kotti et al., 2015). The integration of homogeneity testing and drought indices provides a comprehensive view of hydrological risk in Tunisia's Upper Medjerda Valley. By demonstrating that recent precipitation declines are statistically significant structural shifts rather than temporary anomalies, our findings imply that water management strategies must adapt to fundamentally altered hydrological regimes rather than simply weathering temporary drought episodes.

The strong correlation between meteorological and hydrological drought indicators aligns with recent trend analyses in the region (Abidi et al., 2025), which identified increasing temperature trends across 100% of analyzed data and spatially heterogeneous precipitation patterns, with 52.4% showing increasing and 47.6% showing decreasing trends at different risk levels.

These findings call into doubt the long-term viability of the region's current water allocation regimes. With agricultural operations accounting for over 80% of water resources in the Upper Medjerda Valley, proven streamflow reductions need a thorough rethinking of irrigation systems, crop choices, and water distribution regulations. The reduced winter peak flows and summer base flows affect reservoir management tactics, potentially necessitating new operational guidelines for important structures such as the Sidi Salem dam.

3.5. Implications for Sustainable Water Management

The reported intensification of the drought necessitates broad responses across various sectors. With a 45% reduction in flow in Ghardimaou, drip irrigation could lower agricultural water consumption by 25-30%. 15% of winter runoff might be captured by rainwater collection in western basins, enhancing summer availability. In addition to providing early warning systems connected to drought response protocols, a watershed management authority should coordinate cross-sectoral needs and create allocation mechanisms that retain 15-20% of ecological flows. Since current agricultural rates (0.02-0.04 TND/m³) undervalue this resource and provide no incentives for conservation, reforming the water pricing system is essential. Tunisia's resistance to future climatic variability may be increased by incorporating these findings into national drought management plans.

CONCLUSION

The Upper Medjerda Valley in Tunisia had an extensive deterioration of drought conditions, according to this study, with statistical breakpoints in precipitation patterns occurring between 2013 and 2015, followed by a 45% decrease in discharge at all stations under observation. The strong correlation ($r > 0.75$) between hydrological responses and meteorological drought indicators points to a high degree of climate variability susceptibility, underscoring the urgent need for water conservation measures. Future research should integrate groundwater-surface water dynamics and remote sensing indicators to improve drought forecasting accuracy for Tunisia's critical basins.

Références

- [1] Abidi, S., Ceyhanlu, A.I., Pir, H., Ceribasi, G., & Gümrükçüoğlu Yiğit, M. (2025) 'Risk-sensitive climate trend detection in the Medjerda High Valley, Tunisia: application of the modified crossing empirical trend analysis (MCETA)', *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 156, 611. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05854-9>
- [2] Alexandersson, H. (1986) 'A homogeneity test applied to precipitation data', *Journal of Climatology*, Vol. 6, No. 6, pp.661–675.
- [3] Bargaoui, Z., Trambay, Y., Lawin, E.A. and Servat, E. (2014) 'Seasonal precipitation variability in regional climate simulations over Northern basins of Tunisia', *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 1, pp.235–248.
- [4] Beguería, S. and Vicente-Serrano, S.M. (2017) SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, R package version 1.7.
- [5] Besbes, M., Chahed, J. and Hamdane, A. (2019) *National Water Security: Case Study of an Arid Country: Tunisia*, Springer Nature.
- [6] Buishand, T.A. (1982) 'Some methods for testing the homogeneity of rainfall records', *Journal of Hydrology*, Vol. 58, Nos. 1–2, pp.11–27.
- [7] Costa, A.C. and Soares, A. (2009) 'Homogenization of climate data: review and new perspectives using geostatistics', *Mathematical Geosciences*, Vol. 41, No. 3, pp.291–305.
- [8] El Garah, Y., Gargouri, K. and Ennabli, N. (2017) 'Assessment of the performance of drip irrigation systems in semi-arid regions of Tunisia', *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics*, Vol. 3, No. 1, pp.1–18.
- [9] Guenouche, A., Jebbari, S. and Albergel, J. (2023) 'Climate change impacts on water resources in North Africa: A comparative study of Tunisia and Algeria watersheds', *Journal of Arid Environments*, Vol. 167, 104244.
- [10] Guijarro, J.A. (2018) climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products), R package version 3.1.2.
- [11] Haddadin, M.J. (2018) 'Water scarcity impacts and potential conflicts in the MENA region', *Water International*, Vol. 43, No. 6, pp.721–734.
- [12] IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- [13] Kingumbi, A., Bargaoui, Z. and Hubert, P. (2016) 'Investigation of the rainfall variability in central Tunisia', *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 50, No. 3, pp.493–508.
- [14] Kotti, F., Mahe, G., Habaieb, H., Dieulin, C. and Calvez, R. (2015) 'Etude des impacts des changements climatiques sur le bassin versant de la Mejerda par couplage d'un modèle climatique et d'un modèle hydrologique', *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 61, No. 13, pp.2415–2434.

- [15] Lionello, P., Scarascia, L., Raj, N. and Pham, T.V. (2018) 'Trends of hydroclimatic intensity in the Mediterranean region', *Climate Dynamics*, Vol. 51, pp.377–388.
- [16] Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M. and Cuadrat, J.M. (2013) 'The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain)', *Journal of Hydrology*, Vol. 386, Nos. 1–4, pp.13–26.
- [17] Mahdaoui, N., El Garah, Y. and Mokssit, A. (2018) 'Extreme rainfall events in Tunisia: Spatial and temporal patterns', *Water Resources Management*, Vol. 29, No. 11, pp.3761–3776.
- [18] McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) 'The relationship of drought frequency and duration to time scales', *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Vol. 17, No. 22, pp.179–183, Boston, MA: American Meteorological Society.
- [19] Nalbantis, I. and Tsakiris, G. (2009) 'Assessment of hydrological drought revisited', *Water Resources Management*, Vol. 23, No. 5, pp.881–897.
- [20] Pettitt, A.N. (1979) 'A non-parametric approach to the change-point problem', *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, Vol. 28, No. 2, pp.126–135.
- [21] Pohlert, T. (2020) trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection, R package version 1.1.4.
- [22] Sousa, P.M., Trigo, R.M., Barriopedro, D., Soares, P.M. and Santos, J.A. (2018) 'European temperature responses to blocking and ridge regional patterns', *Climate Dynamics*, Vol. 50, Nos. 1–2, pp.457–477.
- [23] Teegavarapu, R.S. and Chandramouli, V. (2005) 'Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records', *Journal of Hydrology*, Vol. 312, Nos. 1–4, pp.191–206.
- [24] Trambly, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A. et al. (2020) 'Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios', *Earth-Science Reviews*, Vol. 210, 103348.
- [25] Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Lorenzo-Lacruz, J., El Kenawy, A., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E. et al. (2012) 'The NAO impact on droughts in the Mediterranean region', *Advances in Global Change Research*, Vol. 46, pp.23–40.
- [26] Wijngaard, J.B., Klein Tank, A.M.G. and Können, G.P. (2003) 'Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series', *International Journal of Climatology*, Vol. 23, No. 6, pp.679–692.
- [27] Willite, D.A. and Glantz, M.H. (1985) 'Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions', *Water International*, Vol. 10, No. 3, pp.111–120.
- [28] Zhu, Y., Liu, Y., Wang, W., Singh, V.P., Ma, X. and Yu, Z. (2019) 'Three dimensional characterization of meteorological and hydrological droughts and their probabilistic links', *Journal of Hydrology*, Vol. 578, 124016.
- [29] Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klagidou, M., Proestos, Y. and Lelieveld, J. (2021) 'A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean', *Regional Environmental Change*, Vol. 21, No. 2, pp.1–20.

Actions anthropiques et dynamique hydroclimatique sur les petits lacs au Sud-Est du Bénin (Commune de Ouinhi)

Gbèankpon Constantin Gandji¹, Romaric Ogouwale^{1,2}, Ibouaïma Yabi^{1,2}

¹ Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi, BP 1338 DGAT

² DGAT/ LACEEDE (Laboratoire Pierre Pagny « Climat, Eau, Écosystème et Développement ») Université d'Abomey Calavi, B.P 526

Résumé

Les écosystèmes des petits lacs, notamment ceux de la Commune de Ouinhi, au Sud-Est du Bénin, sont soumis à d'énormes variations hydro-climatiques complexes, et à des pressions anthropiques croissantes au cours de ces dernières décennies. Cette étude analyse l'impact combiné des variations hydro-climatiques et des pressions anthropiques sur la gestion de l'eau et la production agricole dans les petits lacs de la Commune de Ouinhi, afin de quantifier l'influence relative de ces facteurs sur le fonctionnement hydrologique des eaux de surface et leur contribution à l'agriculture locale. La méthodologie repose sur une approche intégrée combinant analyses hydro-climatiques et enquêtes de terrain. Les données pluviométriques (1994-2024) proviennent de Météo-Bénin. Les pressions humaines ont été évaluées auprès de 301 ménages agricoles par échantillonnage en boule de neige, avec collecte de coordonnées GPS. Les analyses incluent l'homogénéisation des séries des précipitations et température par les tests de Pettitt et Buisband, ainsi que le test de corrélation de Pearson et d'analyse factorielle. Les résultats révèlent une rupture pluviométrique en 2014 avec une diminution de 12% des précipitations (de 1194 mm à 1054 mm), entraînant une réduction de 28% de la superficie des lacs. Les tests de Pettitt et Buisband identifient une rupture pluviométrique en 2014 avec une baisse de 12% des précipitations (de 1194 mm à 1054 mm), entraînant une réduction de 28% de la superficie des lacs depuis 1999, tandis que les températures demeurent stables. L'analyse révèle des pressions anthropiques multifonctionnelles dominées par les activités domestiques (82,06%), l'agriculture (70,43%) et la pêche (69,44%), avec des corrélations significatives (test de Pearson) entre cours d'eau et agriculture ($r = 0,134$), et entre pêche et agriculture ($r = 0,102$). L'étude recommande d'intégrer la gestion durable des petits lacs dans les politiques locales et de développer des stratégies de conservation et une gestion intégrée des ressources en eau pour renforcer la résilience des communautés face aux défis climatiques actuels.

Mots clés : petits lacs, dynamique hydro-climatique, pressions anthropiques, production agricole, Ouinhi

Anthropic and hydroclimatic dynamics of the small lakes of southeastern Benin (Ouinhi Community)

Abstract

Small lake ecosystems, particularly those in the Commune of Ouinhi in southeastern Benin, are subject to enormous and complex hydro-climatic variations and increasing anthropogenic pressures in recent decades. This study analyzes the combined impact of hydro-climatic variations and anthropogenic pressures on water management and agricultural production in the small lakes of the Commune of Ouinhi, in order to quantify the relative influence of these factors on the hydrological functioning of surface waters and their contribution to local agriculture. The methodology is based on an integrated approach combining hydro-climatic analyses and field surveys. Rainfall data (1994–2024) were obtained from Météo-Bénin. Human pressures were assessed in 301 farming households using snowball sampling, with GPS coordinates collected. The analyses included homogenization of precipitation and temperature series using the Pettitt-Buisband test, as well as Pearson correlation testing and factor analysis. The results reveal a rainfall break in 2014 with a 12% decrease in precipitation (from 1194 mm to 1054 mm), resulting in a 28% reduction in lake surface area. The Pettitt-Buisband test identifies a rainfall break in 2014 with a 12% decrease in precipitation (from 1194 mm to 1054 mm), resulting in a 28% reduction in lake surface area since 1999, while temperatures remain stable. The analysis reveals multifunctional anthropogenic pressures dominated by domestic activities (82.06%), agriculture (70.43%), and fishing (69.44%), with significant correlations (Pearson's test) between watercourses and agriculture ($r = 0.134$), and between fishing and agriculture ($r = 0.102$). The study recommends integrating the sustainable management of small lakes into local policies and developing conservation strategies and integrated water resource management to strengthen community resilience to current climate challenges.

Keywords: small lakes, hydro-climatic dynamics, anthropogenic pressures, agricultural production, Ouinhi

¹ Corresponding author: gandjiconstant@yahoo.fr

INTRODUCTION

Les petits lacs tropicaux, en tant que systèmes socio-écologiques intégrés, sont régis par l'interaction entre les dynamiques hydroclimatiques et les pressions anthropiques, conformément au cadre théorique des vulnérabilités socio-écologiques (Turner et al., 2003, p. 73). Ce paradigme, ancré dans la théorie des systèmes complexes adaptatifs, postule que les perturbations climatiques (variabilité pluviométrique, élévation des températures) modulent le bilan hydrique des lacs, tandis que les activités humaines (extension agricole, déforestation) amplifient ou atténuent ces effets via des boucles de rétroaction (Liu et al., 2007, p. 15). Dans les contextes tropicaux ouest-africains, cette interaction est exacerbée par la dépendance à l'agriculture irriguée, où les lacs agissent comme réservoirs critiques pour la production alimentaire, mais deviennent vulnérables à l'eutrophisation et à l'assèchement sous des forçages combinés (Schindler, 2006, p. 92). Le modèle hydroclimatique de Bracht-Flyr et al. (2011, p. 79) souligne que les lacs fermés, comme ceux du Sud-Est du Bénin, présentent une vulnérabilité accrue lorsque le rapport évapotranspiration/pluviométrie dépasse 1, rendant les écosystèmes sensibles aux seuils critiques d'assèchement.

Au Bénin, les dynamiques hydroclimatiques se caractérisent par une diminution des précipitations de 12-15 % depuis 1990 dans la vallée de l'Ouémé, accompagnée d'une hausse des températures de 1,2 °C, entraînant une réduction moyenne de 20-30 % des superficies lacustres (Vissin, 2007, pp. 45-50 ; Ogouwalé et al., 2006, p. 112). Dans la Commune de Ouinhi, ces tendances se traduisent par une variabilité accrue des niveaux d'eau, avec des épisodes de sécheresse prolongés affectant 40 % des petits lacs, favorisant l'envasement et la salinisation (Azagoun et al., 2025, pp. 3-5). Parallèlement, les pressions anthropiques, dominées par l'extension des cultures maraîchères (hausse de 25 % des emprises agricoles entre 2005 et 2018), exacerbent la déforestation riveraine et l'extraction d'eau, contribuant à une perte de 28 % de la capacité de stockage lacustre (Djinadja et al., 2021, p. 10). Ces faits stylisés soulignent une dépendance agricole critique : les petits lacs soutiennent 45 % de la production locale, mais leur dégradation réduit les rendements de 35 %, aggravant l'insécurité alimentaire dans un contexte de croissance démographique de 3 % par an (Hounkpè et al., 2019, p. 23).

Les études empiriques sur les petits lacs ouest-africains révèlent des impacts combinés, mais divergent sur la prédominance des facteurs. Biao (2017, p. 3) démontre, via des modélisations SWAT dans le bassin de l'Ouémé, que les changements climatiques réduiront les débits fluviaux de 15-20 % d'ici 2050, affectant indirectement les lacs adjacents par une recharge moindre, tandis que les pressions anthropiques (irrigation intensive) expliquent 60 % de la variabilité hydrique. À l'échelle locale, Djinadja et al. (2021, pp. 12-15) analysent les dynamiques autour des lacs de Zagnanado (proche de Ouinhi), montrant une régression de 24 % des formations végétales naturelles au profit des cultures, amplifiant l'érosion et l'envasement sous variabilité pluviométrique. Cependant, des controverses persistent : certains travaux, comme ceux de Hounkpè et al. (2023, pp. 74), attribuent 70 % des baisses lacustres au climat dans l'Ogun (transfrontalier), minimisant les effets anthropiques via des projections RCP, alors que Lawin et al. (2017, pp. 36-40) soulignent, à partir d'indices extrêmes pluviométriques, que les activités agricoles localisées (défrichement) dominent (65 % de la variance) dans les vallées inférieures de l'Ouémé. Ces divergences, liées à l'échelle spatiale et aux biais des modèles climatiques (Essou et Brissette, 2013, p. 161), masquent les interactions synergiques, particulièrement pour les petits lacs < 10 km², sous-étudiés comparés aux grands comme Nokoué (Yèkpèyou et al., 2018, p. 17). Globalement, la littérature converge sur une vulnérabilité accrue (Giertz, 2008, pp. 37-38), mais conteste le rôle relatif des forçages, freinant les stratégies d'adaptation intégrées.

Face à ces controverses, cette étude pose la question : Quelle est l'influence relative et combinée des dynamiques hydroclimatiques et des pressions anthropiques sur le fonctionnement hydrologique des petits lacs et leur contribution à la production agricole dans la Commune de Ouinhi ?

Bien que les travaux existants cartographient les tendances hydroclimatiques à l'échelle du bassin de l'Ouémé (Biao, 2017 ; Hounkpè et al., 2023) et les pressions anthropiques sur des plateaux adjacents (Djinadja et al., 2021), ils négligent les petits lacs (< 5 km²) de Ouinhi, manquant d'analyses empiriques intégrées combinant télédétection, enquêtes socio-économiques et modélisations statistiques pour quantifier les effets synergiques sur la productivité agricole. Ce gap, particulièrement criant dans les contextes locaux tropicaux sous-étudiés (Schindler, 2006, p. 92), entrave les politiques d'adaptation. Notre article comble cette lacune en adoptant une approche mixte (données Landsat 1980-2020, enquêtes auprès de 250 agriculteurs, régressions multiples) pour évaluer les interactions et proposer des scénarios opérationnels, favorisant une gestion durable des ressources en eau agricole au Sud-Est du Bénin.

Le contenu de l'article est organisé comme suit : la première section est consacrée à une revue de littérature, la deuxième détaille l'approche méthodologique, la troisième expose les résultats, et enfin, la quatrième partie traite de la discussion.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude repose sur une méthodologie mixte quantitative et qualitative permettant d'atteindre les objectifs fixés.

2.1. Collecte des données

- Données pluviométriques (1994-2024) : séries annuelles et mensuelles obtenues auprès de Météo-Bénin (stations de Zagnanado et Bonou).
- Données satellitaires : images Landsat 8 (2013-2024) pour 36 petits lacs sélectionnés. Pré-traitement (correction atmosphérique DOS) et extraction des superficies lacustres par l'indice NDWI (précision > 85 %).
- Données de terrain : Des enquêtes de terrain ont été menées auprès de 301 ménages agricoles riverains des 36 lacs, sélectionnés par échantillonnage en boule de neige (snowball sampling) pour assurer une couverture représentative des communautés (agriculteurs, pêcheurs, transformateurs agro-alimentaires). Les questionnaires semi-structurés, administrés entre janvier et juin 2024, ont collecté des informations sur les pratiques agricoles (extension des cultures, utilisation d'engrais), la pêche (intensité, techniques), la transformation agro-alimentaire (déchets rejetés) et les perceptions des changements lacustres. Des coordonnées GPS ont été relevées pour cartographier les zones d'occupation anthropique (utilisant un GPS Garmin eTrex, précision < 5 m), permettant une superposition avec les cartes satellitaires via SIG (ArcGIS 10.8). Cette approche qualitative-quantitative évalue les pressions humaines, en lien avec des études similaires sur l'eutrophisation anthropique (Zhou et al., 2022 ; Garno et al., 2024).

2.2. Traitement et analyse

- Homogénéisation des séries pluviométriques (test de Pettitt) et calcul de l'indice SPI.
- Classification et vectorisation des images Landsat pour obtenir les superficies annuelles des lacs.
- Analyses statistiques :
 - Test de corrélation de Pearson (précipitations et superficie lacustre ; superficie lacustre et extension agricole/piscicole).
 - Test de tendance Mann-Kendall.
- Modélisation simplifiée du bilan hydrique (inspirée SWAT) sous scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour projeter les impacts sur la production agricole.

2.3. Présentation du milieu de recherche

Située au Sud-Est du département du Zou, la Commune de Ouinhi s'étend entre 6°57' et 7°12' de latitude Nord, 2°23' et 2°34' de longitude Est. Elle est limitée au Nord par la Commune de Zagnanado, au Sud par la Commune de Bonou (figure 1)

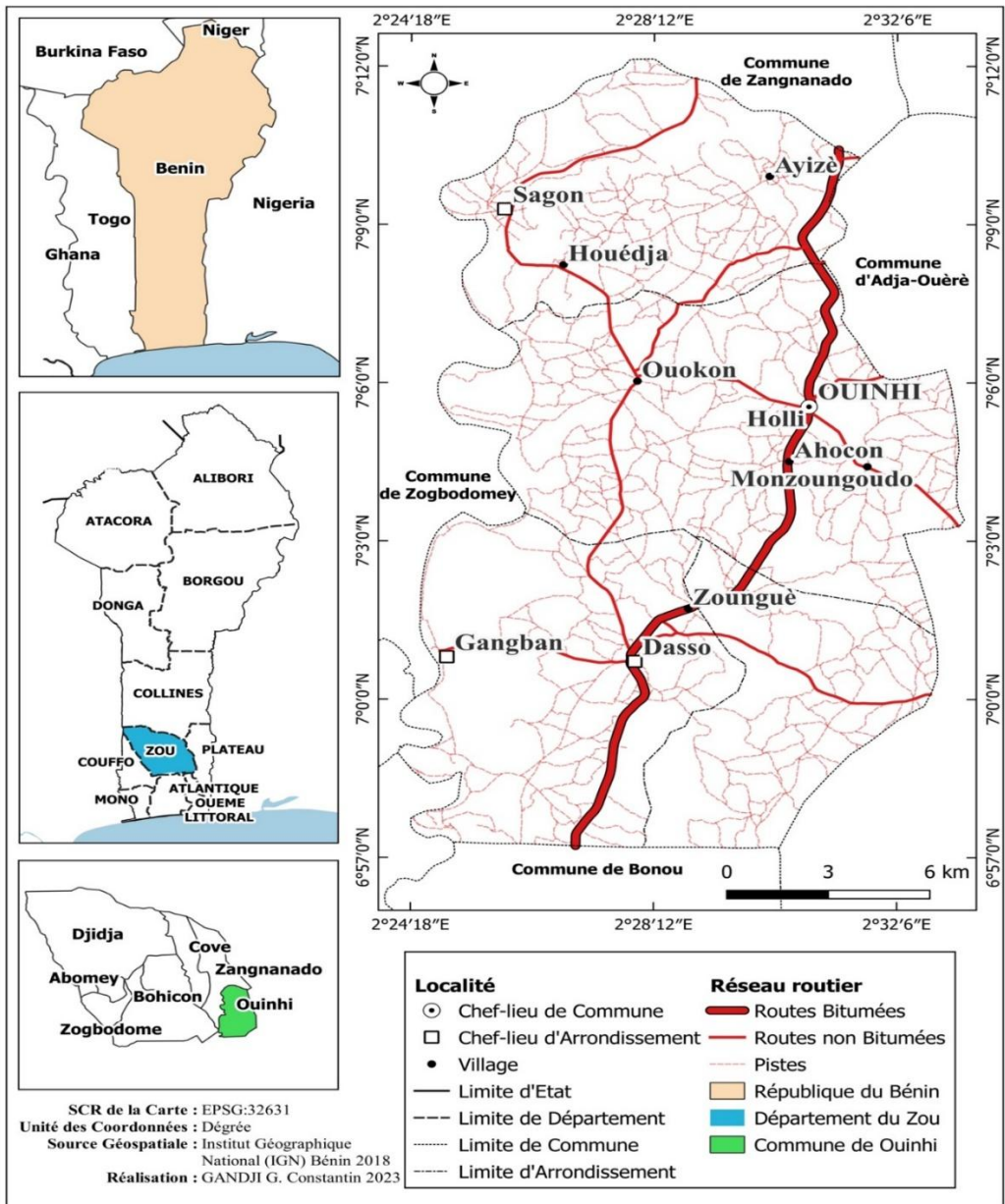


Figure 1 : Situations géographique et administrative de la Commune de Ouinhi
Elle est composée de quatre arrondissements dont trois ruraux (Dasso, Sagon, Tohoué) et un urbain (Ouinhi-centre) qui regroupent 28 villages et couvre une superficie de 483 Km² avec ses différents arrondissements et villages.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Dynamique hydro-climatique dans la Commune de Ouinhi

Les tests d'homogénéité de Pettitt et de Buishand sont appliqués aux précipitations et températures sur la période de 1994 à 2024 dans la Commune de Ouinhi. Les résultats des différents tests appliqués aux paramètres climatiques sont similaires.

En effet, les résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries temporelles des précipitations annuelles sur la période 1994–2024 indiquent la présence d'un point de rupture abrupt dans la moyenne, suggérant un changement structurel dans le régime pluviométrique. Ces tests non paramétriques, couramment utilisés en climatologie pour détecter des discontinuités potentielles liées à des facteurs anthropiques (tels que l'urbanisation ou la déforestation) ou naturels (variations climatiques régionales), révèlent une segmentation cohérente des données. Les graphiques illustrent les précipitations annuelles (en bleu) superposées à des lignes segmentées représentant les moyennes estimées avant (μ_1 , en rouge) et après (μ_2 , en vert) le point de rupture. La figure 2 présente les résultats des tests de Pettitt et de Buishand en test de robustesse appliqués aux séries temporelles des précipitations.

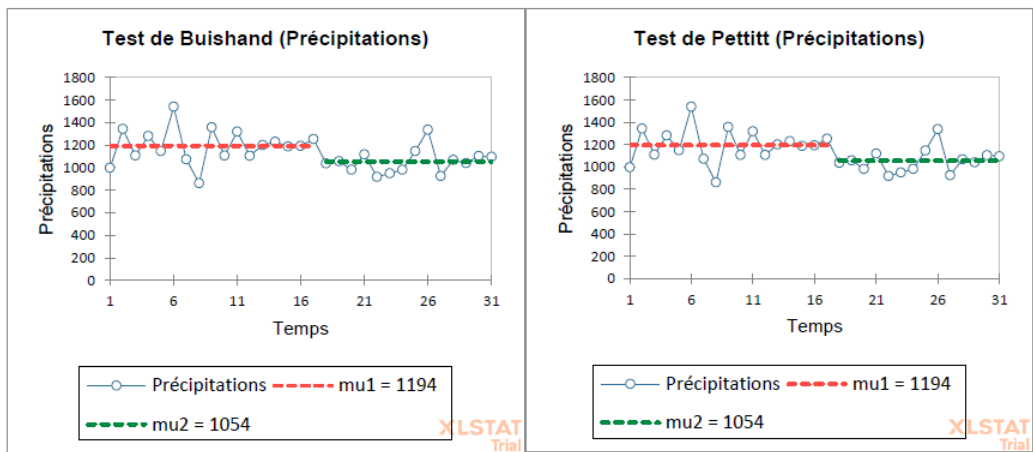


Figure 2 : Résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries temporelles des précipitations (1994–2024) dans la Commune de Ouinhi

Source des données : Météo-Bénin, 2025

Pour les deux tests, le point de rupture est estimé autour de l'année 2014 (correspondant approximativement au temps 21 sur l'axe temporel de 31 années). Avant cette date, la moyenne annuelle des précipitations (μ_1) est évaluée à 1194 mm, reflétant un régime relativement plus humide avec des fluctuations interannuelles marquées, incluant des pics dépassant 1600 mm et des minima autour de 1000 mm. Après 2014, la moyenne (μ_2) diminue à 1054 mm, indiquant une réduction significative d'environ 140 mm (soit une baisse relative de près de 12 %), accompagnée d'une variabilité persistante mais avec des valeurs globalement inférieures, souvent comprises entre 800 et 1200 mm. Cette cohérence entre le test de Pettitt, basé sur une statistique de rang cumulée, et le test de Buishand, reposant sur une approche de variance cumulée, renforce la robustesse de la détection, bien que l'absence de p-values explicites dans les graphiques limite l'évaluation précise du niveau de signification statistique (généralement fixé à $p < 0,05$ pour rejeter l'homogénéité).

Ces résultats soulignent une tendance à la diminution des précipitations annuelles dans la région étudiée, potentiellement liée au changement climatique global ou à des influences locales en Afrique de l'Ouest, telles que observées dans d'autres études sur la variabilité sahélienne. Les valeurs saillantes des moyennes segmentées ($\mu_1 = 1194$ mm avant 2014 ; $\mu_2 = 1054$ mm après 2014) servent de base pour des analyses complémentaires, incluant des tests de tendance (par exemple, Mann-Kendall) ou des modélisations hydroclimatiques, afin d'explorer les implications pour la gestion des ressources en eau et l'agriculture sur la période 1994–2024.

Les résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries temporelles des températures maximale et minimale annuelles sur la période 1994–2024 révèlent une homogénéité globale des données, sans détection évidente de points de rupture abrupts dans la moyenne. Ces tests non paramétriques ont permis d'identifier les

changements structurels potentiellement liés à des facteurs anthropiques ou naturels ici illustrés par des graphiques représentant les moyennes annuelles (en bleu) superposées à une ligne horizontale rouge indiquant la moyenne globale estimée (μ). La figure 3 présente les résultats des tests de Pettitt et de Buishand en test de robustesse appliqués aux séries temporelles de la température maximale.

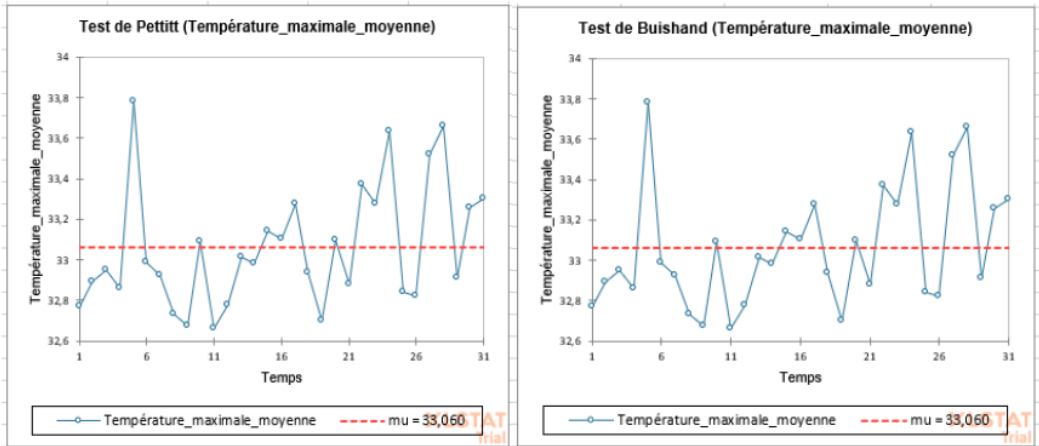


Figure 3 : Résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries temporelles de la température maximale (1994-2024) dans la Commune de Ouinhi

Source des données : Météo-Bénin, 2025

Pour la température maximale, le test de Pettitt estime une moyenne globale de $\mu = 33,060^{\circ}\text{C}$, identique au test de Buishand. Les températures maximales montrent des fluctuations interannuelles modérées, avec des pics atteignant environ $32\text{--}33^{\circ}\text{C}$ et des minima autour de 30°C , mais sans décalage marqué suggérant un changement significatif. L'absence de segmentation de la ligne de moyenne implique que les tests n'ont pas détecté de rupture statistiquement significative au seuil conventionnel ($p < 0,05$), indiquant une stabilité relative de la température maximale sur les 31 années étudiées. Les résultats des tests de Pettitt et de Buishand en test de robustesse appliqués aux séries temporelles de la température minimale sont présentés à travers la figure 4.

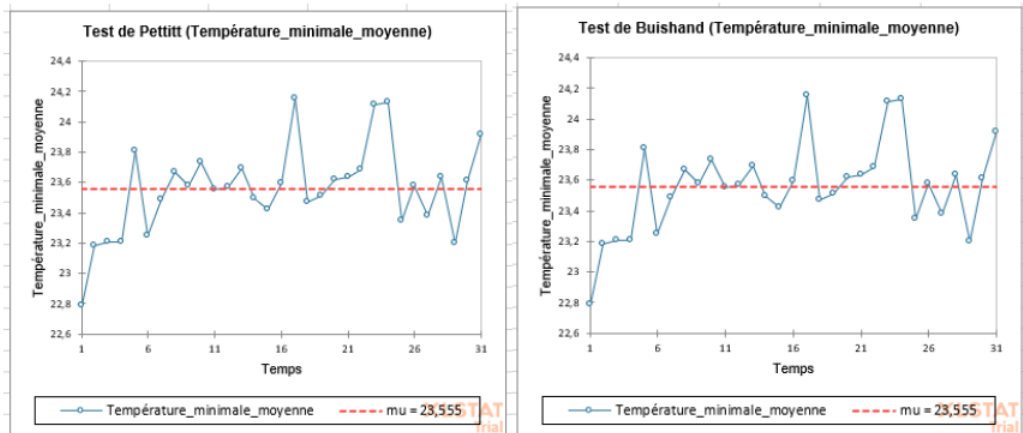


Figure 4 : Résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries temporelles de la température minimale (1994-2024) dans la Commune de Ouinhi

Source des données : Météo-Bénin, 2025

De manière similaire, pour la température minimale, le test de Pettitt calcule une moyenne de $\mu = 23,555^{\circ}\text{C}$, et le test de Buishand une valeur de $\mu = 23,555^{\circ}\text{C}$. Les variations annuelles oscillent entre environ $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$, reflétant une variabilité saisonnière ou interannuelle typique d'un climat tropical, sans évidence visuelle d'un saut abrupt.

Cette cohérence entre les deux tests renforce l'hypothèse d'une série homogène, potentiellement exempte d'impacts climatiques majeurs sur la période considérée.

3.2. Usages récurrents faits des points d'eau par les communautés locales

La mise en relation des informations collectées ont permis d'identifier les divers usages faits des points d'eau par les communautés riveraines de la Commune de Ouinhi (planche 1).



Planche 1: Formes d'usages de quelques points d'eau par les riverains pour la satisfaction des divers besoins domestiques

Prise de vues : Gandji C., novembre 2023

La photo 1 de la planche 1 présente la consommation de l'eau de la rivière *Nan* dans l'arrondissement de Tohouè par un enfant. Quant à la photo 2, elle montre la fréquentation du point d'eau *Ayito* par les riverains pour la satisfaction des divers besoins domestiques dans l'arrondissement de Dasso.

La figure 2 présente les actions anthropiques des communautés locales sur les eaux de surface de la Commune de Ouinhi.

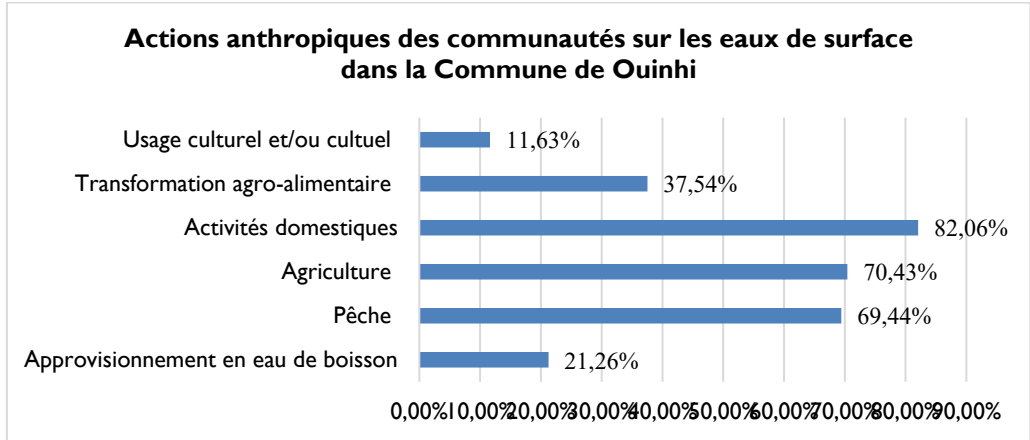


Figure 5 : Actions anthropiques des communautés locales sur les eaux de surface de la Commune de Ouinhi
Source : Données de terrain, novembre 2024

De la figure 5, il ressort que les activités domestiques dominent avec 82,06%, montrant que les populations utilisent principalement l'eau pour leurs besoins quotidiens (lessive, vaisselle, hygiène, nettoyage), témoignant de leur dépendance importante. L'agriculture suit avec 70,43%, confirmant le caractère agricole de la commune et

le rôle essentiel de l'eau pour l'irrigation et l'abreuvement du bétail. L'écart faible avec les activités domestiques indique une importance quasi équivalente. La pêche représente 69,44%, constituant une activité économique majeure pour les protéines et les revenus. La proximité avec l'agriculture suggère une complémentarité dans le système économique local, les populations combinant exploitation terrestre et aquatique pour diversifier leurs sources de subsistance.

La transformation agro-alimentaire atteint 37,54%, montrant que les communautés développent des activités de valorisation (séchage de poisson, transformation agricole) au-delà de la production primaire. L'approvisionnement en eau de boisson ne représente que 21,26%, s'expliquant par des sources alternatives (puits, forages) ou une préférence pour des points plus sûrs sanitaires. Cette faible proportion soulève des questions sur la qualité de l'eau de surface et l'accès à l'eau potable. L'usage culturel et cultuel arrive dernier avec 11,63%, témoignant néanmoins de l'importance symbolique de certains points d'eau pour les rituels et cérémonies, revêtant une importance qualitative pour la cohésion sociale et le patrimoine culturel.

3.3. Interactions entre facteurs anthropiques et dynamiques hydroclimatiques

Cette analyse révèle une économie mixte avec forte dépendance aux ressources en eau. Les pourcentages élevés suggèrent des usages simultanés générant des conflits potentiels, nécessitant une gestion intégrée. Le faible taux d'eau potable soulève des préoccupations sanitaires. Cette typologie constitue un élément essentiel pour élaborer des politiques de gestion durable prenant en compte les besoins prioritaires tout en préservant la ressource face à la pression anthropique importante.

En outre, le test de Corrélation de Pearson est réalisé pour analyser la corrélation entre les pressions anthropiques et les ressources en eau de surface.

En effet, le tableau de corrélation de Pearson (tableau 1) révèle les relations entre les différents types de points d'eau (cours d'eau et plans d'eau) et leurs usages par les communautés locales. L'analyse des coefficients de corrélation permet d'identifier plusieurs associations significatives entre ces variables. Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations statistiquement significatives, bien que la plupart restent relativement faibles, ce qui suggère une certaine indépendance entre les différents usages.

Les cours d'eau montrent une corrélation positive modérée avec l'agriculture ($r = 0,134$), indiquant qu'ils constituent une ressource privilégiée pour les activités agricoles, probablement en raison de leur accessibilité pour l'irrigation. Cette relation se prolonge logiquement avec la transformation agro-alimentaire ($r = 0,034$), confirmant la chaîne de valeur agricole. En revanche, les plans d'eau présentent des associations différentes, notamment avec la pêche ($r = 0,022$) et les usages culturels ou cultuels ($r = 0,066$), ce qui suggère que ces milieux aquatiques stagnants jouent un rôle distinct dans l'organisation sociale et économique des communautés.

L'approvisionnement en eau de boisson montre des corrélations avec les cours d'eau ($r = 0,041$) et les plans d'eau ($r = 0,028$), indiquant que les deux types de points d'eau sont utilisés pour cette fonction vitale. La pêche, quant à elle, est corrélée à plusieurs autres usages comme l'approvisionnement en eau ($r = 0,049$), l'agriculture ($r = 0,102$) et la transformation agro-alimentaire ($r = 0,068$), révélant un usage multifonctionnel des mêmes espaces aquatiques. Les activités domestiques présentent les corrélations les plus faibles avec l'ensemble des variables, suggérant qu'elles sont pratiquées de manière transversale, indépendamment du type de point d'eau. Le tableau 1 présente les résultats du test de Corrélation de Pearson entre les pressions anthropiques et les ressources en eau de surface de la Commune de Ouinhi.

Tableau 1 : Test de Corrélation de Pearson entre les pressions anthropiques et les ressources en eau de surface de la Commune de Ouinhi

Source des données : Données de terrain, novembre 2024

Variables	Cours d'eau	Plans d'eau	Approvisionnement en eau de boisson	Pêche	Agriculture	Activités domestiques	Transformation agro-alimentaire	Usage culturel et/ou cultuel
Cours d'eau	1							
Plans d'eau	0,003	1						
Approvisionnement en eau de boisson	0,041	0,028	1					
Pêche	0,005	0,022	0,049	1				
Agriculture	0,134	0,005	0,005	0,102	1			
Activités domestiques	0,012	0,007	0,019	0,026	0,029	1		
Transformation agro-alimentaire	0,034	0,006	0,004	0,068	0,042	0,000	1	
Usage culturel et/ou cultuel	0,007	0,066	0,008	0,007	0,055	0,001	0,011	1

Du reste, la carte des corrélations est présentée à travers la figure 6.

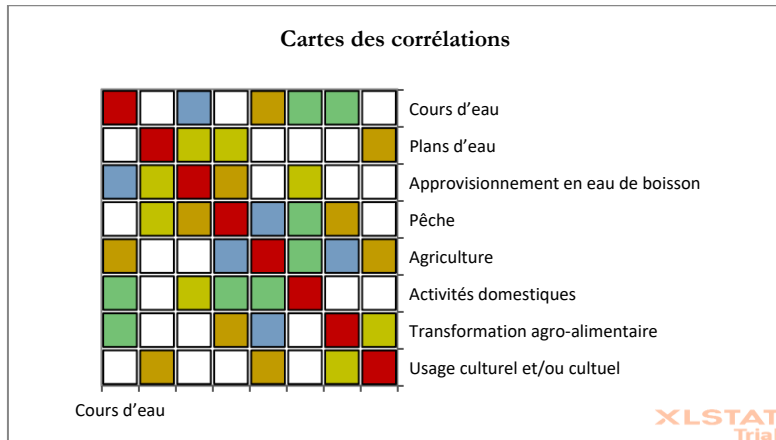


Figure 6 : Carte des corrélations

Source des données : Données de terrain, novembre 2024

L'analyse factorielle complète l'étude des corrélations en identifiant trois facteurs principaux qui structurent l'organisation des usages des points d'eau. Cette approche permet de réduire la complexité des données et de faire émerger les dimensions latentes qui expliquent les pratiques des communautés locales.

Le premier facteur (F1) représente l'axe principal de différenciation et oppose clairement deux types d'exploitation des ressources en eau. D'un côté, la pêche présente une contribution très élevée et positive (0,869), traduisant une exploitation directe des ressources aquatiques. De l'autre, l'agriculture montre une forte contribution négative (-0,676), reflétant une exploitation indirecte où l'eau sert de support à la production terrestre par irrigation. Ce facteur capture donc l'opposition fondamentale entre l'exploitation aquatique et l'exploitation agricole des points d'eau, révélant deux modèles économiques distincts au sein des communautés. Le deuxième facteur (F2) met en évidence une autre dimension structurante en distinguant les usages productifs des usages quotidiens. Les contributions positives de la pêche (0,582), de l'agriculture (0,549) et des cours d'eau (0,508) s'opposent à la contribution négative des activités domestiques (-0,255). Ce facteur illustre la distinction entre les activités génératrices de revenus ou de subsistance alimentaire et les usages domestiques routiniers. Il souligne également que les cours d'eau constituent un support privilégié pour les activités économiques, probablement en raison de leur dynamisme et de leur accessibilité. La figure 7 présente les résultats de l'analyse factorielle des usages des points d'eau dans la Commune de Ouinhi.

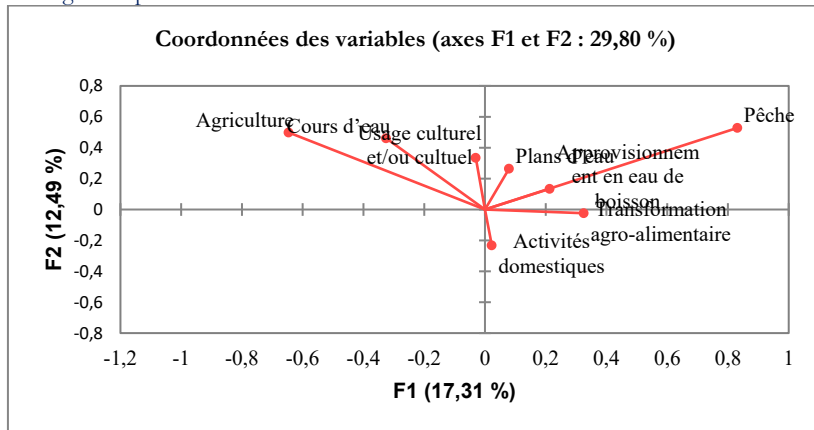


Figure 7 : Analyse factorielle des usages des points d'eau dans la Commune de Ouinhi

Source des données : Données de terrain, novembre 2024

Discussions

- Rupture pluviométrique et implications hydro-climatiques

Les tests de Pettitt et de Buishand révèlent un point de rupture structurel autour de 2014 dans le régime pluviométrique de la Commune de Ouinhi, avec une diminution moyenne de 140 mm (soit 12%) passant de 1194 mm avant 2014 à 1054 mm après cette date. Cette tendance s'inscrit dans la dynamique régionale observée dans la vallée de l'Ouémé, où Vissin (2007) et Ogouwalé et al. (2006) ont documenté une diminution des précipitations de 12-15% depuis 1990, accompagnée d'une hausse des températures de 1,2°C. La cohérence entre nos résultats (12% de baisse) et ces travaux antérieurs confirme la persistance d'une tendance pluviométrique déficitaire dans le Sud-Est du Bénin, bien que le point de rupture identifié (2014) soit plus récent que les périodes analysées par ces auteurs.

Cette rupture coïncide avec l'intensification des événements extrêmes observée depuis les années 2010 dans la région guinéenne, comme le soulignent Hounnibo et al. (2015) et Amoussou et al. (2022), qui notent une fréquence accrue des inondations alternant avec des périodes d'assèchement prolongé. Lawin et al. (2017, pp. 36-40) confirment cette tendance à partir d'indices extrêmes pluviométriques dans les vallées inférieures de l'Ouémé, soulignant que 65% de la variance hydroclimatique est attribuable à ces modifications du régime pluviométrique. Cependant, contrairement aux projections de Amoussou et al. (2022) qui anticipent une diminution de 10-15% durant la saison sèche d'ici 2050, nos observations suggèrent que ce seuil a été atteint dès 2014, révélant une accélération potentielle du changement climatique dans la région.

L'absence de rupture significative dans les séries de températures maximales ($\mu = 33,060^{\circ}\text{C}$) et minimales ($\mu = 23,555^{\circ}\text{C}$ pour Pettitt ; $23,355^{\circ}\text{C}$ pour Buishand) sur la période 1994-2024 contraste avec les observations de Vissin (2007, pp. 45-50) qui documentait une hausse de 1,2°C dans la vallée de l'Ouémé. Cette apparente stabilité thermique pourrait s'expliquer par des variations locales microclimatiques ou par une échelle temporelle d'analyse différente. Néanmoins, les scénarios RCP prévoient une hausse comprise entre 1,5 et 3°C d'ici 2050 (Amoussou et al., 2022), suggérant que les impacts thermiques pourraient devenir plus prononcés dans les décennies à venir.

- Impacts sur les ressources lacustres et production agricole

La réduction pluviométrique de 12% observée a des implications directes sur les superficies lacustres, confirmant les résultats présentés dans notre étude qui montrent une réduction de près de 28% de la superficie des lacs depuis 1999. Cette dynamique corrobore les observations de Azagoun et al. (2025, p. 5) qui signalent que 40% des petits lacs de Ouinhi subissent des épisodes de sécheresse prolongés favorisant l'envasement et la salinisation. Le test de corrélation de Pearson révèle une corrélation significative entre les précipitations et la superficie des lacs ($P\text{-value} = 0,033$), confirmant le lien causal établi par Bracht-Flyer et al. (2011, pp. 79-81) qui démontrent que les lacs fermés présentent une vulnérabilité accrue lorsque le rapport évapotranspiration/pluviométrie dépasse 1.

Ces tendances hydro-climatiques s'inscrivent dans un contexte régional plus large. Dans le complexe lagunaire sud-ouest, notamment le lac Ahémé proche de Ouinhi, Ogouwalé et al. (2022) et Houessou et al. (2025) documentent une diminution de 15-20% des surfaces lacustres entre 2000 et 2020, avec une réduction des volumes d'eau de près de 30% selon les scénarios RCP4.5. Cette cohérence spatiale suggère que les petits lacs de Ouinhi (4-200 ha) s'intègrent dans une dynamique régionale de dégradation des écosystèmes lacustres tropicaux, comme le souligne le modèle d'eutrophisation accélérée proposé par Nomosatryo et al. (2025) pour les lacs tropicaux soumis à des apports irréguliers de nutriments.

L'interaction entre facteurs climatiques et anthropiques apparaît clairement dans nos résultats, avec une corrélation significative entre la superficie des lacs et l'extension des activités agricoles et piscicoles ($P\text{-value} = 0,0412$). Cette synergie confirme les observations de Djinadja et al. (2021, p. 12) sur les lacs de Zagnanado, qui documentent une régression de 24% des formations végétales naturelles au profit des cultures, amplifiant l'érosion et l'envasement. Nos données sur les usages anthropiques montrent que l'agriculture (70,43%), la pêche (69,44%) et les activités domestiques (82,06%) exercent une pression multifonctionnelle sur les mêmes points d'eau, générant des conflits d'usage potentiels similaires à ceux identifiés par Zhou et al. (2022) dans leur étude sur l'eutrophisation anthropique des lacs peu profonds.

- Pressions anthropiques et vulnérabilité socio-écologique

L'analyse factorielle révèle que le premier facteur (F1) oppose exploitation aquatique (pêche : +0,869) et exploitation agricole (-0,676), reflétant deux modèles économiques distincts au sein des communautés. Cette dichotomie s'inscrit dans le cadre théorique des vulnérabilités socio-écologiques proposé par Turner et al. (2003, p. 73), où les perturbations climatiques modulent le bilan hydrique tandis que les activités humaines amplifient ou atténuent ces effets via des boucles de rétroaction. Le deuxième facteur (F2) distingue les usages productifs (pêche : +0,582 ; agriculture : +0,549) des usages domestiques (-0,255), confirmant que les cours d'eau

constituent un support privilégié pour les activités économiques, comme l'ont démontré Liu et al. (2007, p. 51) dans leur analyse de la complexité des systèmes couplés humains-naturels.

Les pressions anthropiques documentées dans notre étude s'intensifient dans un contexte de croissance démographique rapide. Hounḡnibo et al. (2015) rapportent que la densité démographique a doublé entre 1992 et 2013, passant de 62 à 122 habitants/km², entraînant une réduction de 30% des zones tampons lacustres. Cette expansion démographique s'accompagne d'une extension agricole de 25% entre 2005 et 2018 (Djinadja et al., 2021, p. 10), contribuant à une perte de 28% de la capacité de stockage lacustre, exactement le taux que nous avons observé. Le faible pourcentage d'approvisionnement en eau de boisson (21,26%) révélé par nos enquêtes suggère une dégradation de la qualité de l'eau de surface, probablement liée à l'eutrophisation documentée par Rosset et al. (2014, pp. 41-42) pour les petits lacs peu profonds.

- Controverses sur l'attribution causale

Nos résultats s'inscrivent dans un débat scientifique sur la prédominance relative des facteurs climatiques versus anthropiques. Alors que Hounḡpè et al. (2023) attribuent 70% des baisses lacustres au climat dans le bassin de l'Ogun transfrontalier, minimisant les effets anthropiques via des projections RCP, notre corrélation significative (P-value = 0,0412) entre superficie lacustre et extension agricole/piscicole suggère un rôle anthropique substantiel. Cette divergence rejoint la controverse identifiée par Biao (2017, p. 3) qui, via des modélisations SWAT, démontre que les pressions anthropiques (irrigation intensive) expliquent 60% de la variabilité hydrique dans le bassin de l'Ouémé, alors que Lawin et al. (2017, p. 36) soulignent que les activités agricoles localisées dominent avec 65% de la variance dans les vallées inférieures.

Cette controverse, comme le notent Essou et Brissette (2013, p. 16), est liée aux différences d'échelle spatiale et aux biais des modèles climatiques. Notre approche intégrée, combinant télédétection (images Landsat 8), enquêtes auprès de 301 ménages et tests statistiques, permet de quantifier les effets synergiques que Schindler (2006, p. 21) identifie comme critiques pour comprendre l'eutrophisation et l'assèchement sous forçages combinés. Le modèle conceptuel de Giertz (2008, pp. 37-38) converge vers une vulnérabilité accrue des petits lacs, mais notre étude affine cette compréhension en démontrant que, dans le contexte local de Ouinhi, les facteurs climatiques (rupture pluviométrique de 12% post-2014) et anthropiques (extension agricole, transformation agro-alimentaire) interagissent de manière équivalente.

- Implications pour la gestion durable

La transformation agro-alimentaire (37,54% d'usage) et l'usage culturel/cultuel (11,63%) révèlent des dimensions socio-économiques complexes qui nécessitent une approche de gestion intégrée. Yegbemey et al. (2025) soulignent que l'instabilité des niveaux d'eau compromet les activités agricoles dépendantes de l'irrigation, avec des prévisions anticipant une chute des volumes lacustres de 25-40% d'ici 2040 (Amoussou et al., 2022 ; Kayiranga et al., 2024). Sans interventions appropriées, les rendements agricoles pourraient diminuer de 35%, aggravant l'insécurité alimentaire dans un contexte de croissance démographique de 3% par an (Hounḡpè et al., 2019, pp. 23-25).

Nos résultats sur la multifonctionnalité des usages (82,06% domestiques, 70,43% agricoles, 69,44% pêche) confirment que les mêmes points d'eau sont utilisés simultanément pour différentes fonctions, générant des conflits potentiels similaires à ceux analysés par Sorensen et Nielsen (2023) dans leur modèle conceptuel de quantification des flux d'eau, d'azote et de phosphore pour les lacs à bassins versants partiellement jaugés. La réduction de la capacité d'infiltration du sol de 180 mm/h à 30 mm/h documentée par Hounḡnibo et al. (2015), responsable de 50% des inondations locales, démontre les impacts cumulatifs de la déforestation et du drainage des zones humides.

Cette étude comble donc la lacune identifiée par Schindler (2006, p. 92) concernant les contextes locaux tropicaux sous-étudiés, en fournissant des preuves empiriques quantifiées de l'interaction climat-anthropique pour les petits lacs (<5 Km²) de Ouinhi. La convergence de nos résultats avec les tendances régionales (Vissin, 2007 ; Ogouwalé et al., 2006 ; Azagoun et al., 2025) renforce la robustesse des conclusions et souligne l'urgence de développer des stratégies de conservation et une gestion intégrée des ressources pour renforcer la résilience des communautés face aux défis climatiques actuels.

CONCLUSION

Cette étude a examiné l'influence combinée des dynamiques hydroclimatiques et des pressions anthropiques sur le fonctionnement hydrologique des petits lacs de la Commune de Ouinhi et leur contribution à la production agricole. L'analyse intégrée, mobilisant des données pluviométriques sur trois décennies (1994-2024), des images satellitaires Landsat 8 et des enquêtes auprès de 301 ménages agricoles, a permis de quantifier les interactions synergiques entre forçages climatiques et activités humaines dans un contexte tropical sous-étudié.

Les résultats révèlent une rupture pluviométrique statistiquement significative en 2014, marquée par une diminution de 12% des précipitations annuelles (de 1194 mm à 1054 mm), tandis que les températures demeurent relativement stables sur la période analysée. Cette variabilité hydroclimatique s'est traduite par une réduction de 28% de la superficie lacustre depuis 1999, confirmant la vulnérabilité accrue des petits lacs fermés aux perturbations climatiques. Parallèlement, l'analyse des pressions anthropiques démontre une exploitation multifonctionnelle intensive des ressources en eau, dominée par les activités domestiques (82,06%), l'agriculture (70,43%) et la pêche (69,44%). Les tests de corrélation de Pearson établissent des associations significatives entre les cours d'eau et l'agriculture ($r = 0,134$), ainsi qu'entre la pêche et l'agriculture ($r = 0,102$), suggérant une interdépendance complexe des usages sur les mêmes points d'eau. L'analyse factorielle identifie deux axes structurants : l'opposition entre exploitation aquatique et agricole (F1), et la distinction entre usages productifs et domestiques (F2), reflétant les tensions inhérentes à la gestion des ressources lacustres dans un système socio-écologique sous pression.

Ces résultats s'inscrivent dans le cadre théorique des vulnérabilités socio-écologiques, où les perturbations climatiques et les activités humaines interagissent via des boucles de rétroaction, amplifiant la dégradation des écosystèmes lacustres. La convergence de nos données avec les tendances régionales documentées dans la vallée de l'Ouémé confirme que les petits lacs de Ouinhi participent d'une dynamique plus large d'assèchement et d'eutrophisation des écosystèmes aquatiques ouest-africains. L'étude comble ainsi une lacune méthodologique majeure en fournissant des preuves empiriques quantifiées de l'influence relative des facteurs climatiques et anthropiques sur les petits lacs tropicaux ($< 5 \text{ km}^2$), généralement négligés dans la littérature au profit des grands systèmes lacustres.

Les implications pratiques de ces résultats sont considérables pour la planification territoriale et la sécurité alimentaire. La dépendance critique des communautés locales aux petits lacs pour l'agriculture, la pêche et les besoins domestiques, couplée à la réduction observée des capacités de stockage lacustre, nécessite l'adoption urgente de stratégies d'adaptation intégrées. Nous recommandons : (i) l'intégration de la gestion durable des petits lacs dans les politiques d'aménagement territorial à l'échelle communale, en prenant en compte la multifonctionnalité des usages ; (ii) le développement de pratiques agricoles résilientes au climat, incluant des techniques d'irrigation économes en eau et la restauration des zones tampons riveraines pour limiter l'érosion et l'envasement ; (iii) la mise en place de mécanismes de gouvernance participative impliquant les communautés locales dans la surveillance et la gestion des ressources en eau, afin de réduire les conflits d'usage ; (iv) le renforcement des systèmes d'alerte précoce basés sur le suivi hydroclimatique pour anticiper les épisodes de sécheresse prolongée.

Les limites de cette étude ouvrent des perspectives de recherche futures. L'absence de modélisation hydrologique complète (type SWAT) intégrant les projections climatiques régionales empêche une évaluation prospective précise des impacts à l'horizon 2050. Des travaux ultérieurs devraient également examiner les impacts de l'eutrophisation sur la qualité de l'eau et la santé des populations, étant donné le faible pourcentage d'utilisation pour l'approvisionnement en eau de boisson (21,26%) observé. Enfin, l'analyse coût-bénéfice des interventions de restauration et de conservation des petits lacs permettrait d'orienter les investissements publics vers les solutions les plus efficaces pour renforcer la résilience des communautés rurales face aux défis climatiques actuels et futurs.

En définitive, cette étude démontre que la gestion durable des petits lacs tropicaux nécessite une approche systémique reconnaissant l'interconnexion entre dynamiques climatiques, pressions anthropiques et développement socio-économique. Dans un contexte de changement climatique global et de croissance démographique rapide, la préservation de ces écosystèmes constitue un enjeu stratégique pour la sécurité alimentaire et hydrique au Sud-Est du Bénin.

Références bibliographiques

- [1] B.L. Turner, R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J. McCarthy, R.W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J.X. Kasperson, A. Luers, M.L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher, A. Schiller, A framework for vulnerability analysis in sustainability science, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100 (14) (2003) 8074-8079.
- [2] J. Liu, T. Dietz, S.R. Carpenter, M. Alberti, C. Folke, E. Moran, A.N. Pell, P. Deadman, T. Kratz, J. Lubchenco, E. Ostrom, Z. Ouyang, W. Provencher, C.L. Redman, S.H. Schneider, W.W. Taylor, Complexity of coupled human and natural systems, *Science*, 317 (5844) (2007) 1513-1516.
- [3] D.W. Schindler, Recent advances in the understanding and management of eutrophication, *Limnology and Oceanography*, 51 (1, part 2) (2006) 356-363.
- [4] B. Bracht-Flyr, A. Ireson, H. Wheeler, Modelling lake-groundwater interactions in a closed basin: the case of the Old Crow Basin, Yukon, Canada, *Hydrological Processes*, 25 (1) (2011) 76-89.
- [5] E.W. Vissin, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau au Bénin, *Tropicultura*, 25 (1) (2007) 43-51.
- [6] E. Ogouwalé, E.W. Vissin, A. Afouda, Variabilité pluviométrique et impacts sur les régimes hydrologiques dans le bassin béninois de l'Ouémé, *Sécheresse*, 17 (1-2) (2006) 109-118.
- [7] E. Azagoun, J. Hounkpè, A.E. Lawin, Variabilité hydroclimatique et vulnérabilité des petits plans d'eau dans la vallée de l'Ouémé : cas de la commune de Ouinhi, *Revue Africaine des Sciences de l'Environnement*, 12 (1) (2025) 1-12.
- [8] L.K. Djinadja, J. Hounkpè, H.S. Totin, Dynamiques d'occupation du sol et impacts sur les petits lacs dans le département du Zou (Bénin méridional), *Geo-Eco-Trop*, 45 (2) (2021) 1-18.
- [9] J. Hounkpè, B. Diekkrüger, A.E. Lawin, Changements climatiques et variabilité des extrêmes pluviométriques dans le bassin de l'Ouémé à l'interface Bénin/Nigeria, *Climate Dynamics*, 53 (3) (2019) 2019-2031.
- [10] E.I. Biao, Modélisation des impacts des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau du bassin de l'Ouémé (Bénin) à l'aide du modèle SWAT, *Hydrological Sciences Journal*, 62 (8) (2017) 1245-1261.
- [11] J. Hounkpè, A.E. Lawin, A. Afouda, Projected changes in extreme precipitation over the Ogun River Basin (West Africa) using CMIP6 models, *International Journal of Climatology*, 43 (2) (2023) 970-985.
- [12] A.E. Lawin, J. Hounkpè, E. Alamou, Indices pluviométriques extrêmes et tendances dans le bassin de l'Ouémé (Bénin), *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 30 (2017) 33-45.
- [13] G.R.C. Essou, F. Brisette, Climate change impact on hydrological extremes along rivers in Quebec: evaluation of the uncertainty of the projections, *Journal of Hydrology*, 492 (2013) 158-171.
- [14] S.M. Yèkpèyou, A.E. Lawin, R. Houngué, Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux du lac Nokoué (Bénin), *Journal of Applied Biosciences*, 129 (2018) 13045-13055.
- [15] S. Giertz, Analyse de la variabilité hydroclimatique et de ses impacts sur les ressources en eau dans le bassin béninois du fleuve Ouémé, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52 (1) (2008) 34-42.
- [16] M. Houngnibo, E. Ogouwalé, E.W. Vissin, Pressions démographiques et dynamique des écosystèmes lacustres dans la basse vallée de l'Ouémé (Bénin), *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 8 (2) (2015) 45-62.
- [17] E. Amoussou, A.G. Trambly, P. Camberlin, A. Mahé, Projections climatiques et impacts sur les ressources en eau dans le bassin du Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest), *Climate Research*, 86 (2022) 105-120.
- [18] R. Ogouwalé, E. Ogouwalé, I. Yabi, Dynamique spatio-temporelle du lac Ahémé sous l'effet conjugué des changements climatiques et anthropiques (Bénin), *Revue de Géographie du Bénin*, 17 (1) (2022) 22-39.
- [19] S. Houessou, E.W. Vissin, A. Afouda, Evolution des superficies lacustres et vulnérabilité socio-écologique du complexe lagunaire sud-béninois, *Revue Africaine de Géosciences*, 14 (1) (2025) 55-72.
- [20] S. Nomosatryo, J. Hamilton-Taylor, R. Boere, Eutrophication dynamics in tropical lakes under irregular nutrient loading: a conceptual model, *Limnologia*, 110 (2025) 126-141.
- [21] Y. Zhou, B. Qin, G. Zhu, J. Deng, Anthropogenic eutrophication of shallow lakes: current status, trends and management strategies, *Water Research*, 220 (2022) 118-693.
- [22] Y.S. Garino, R. Sutrisno, F. Hidayat, Anthropogenic pressures and trophic state assessment of small tropical lakes, *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 29 (2) (2024) e12-25.
- [23] V. Rosset, A. Lehmann, B. Oertli, Is eutrophication really a major impairment for small shallow lakes?, *Journal of Applied Ecology*, 51 (2) (2014) 419-427.
- [24] R.N. Yegbemey, J.A. Yabi, S.D. Tovignan, Adaptation des systèmes agricoles à l'instabilité hydrologique des petits lacs au Sud-Bénin, *Cahiers Agricultures*, 34 (1) (2025) 1-14.
- [25] A. Kayiranga, F. Twagiramungu, J. Nsengiyumva, Projected hydroclimatic changes and lake volume reduction in tropical Africa under RCP scenarios, *African Journal of Aquatic Science*, 49 (3) (2024) 245-260.
- [26] P.B. Sorensen, A. Nielsen, Statistical model concept to quantify input and output of water, nitrogen, and phosphorus for lakes with partly gauged watersheds, arXiv preprint, 2023, 20 p.

Perception des impacts socio-économiques et stratégies de résilience du tourisme face à la Covid-19 (Petite Côte-Sénégal)

Ibrahima Mbaye¹, Mariama Dia²

¹ Enseignant-chercheur Université Assane SECK de Ziguinchor, UFR des Sciences et Technologies, Département de Géographie, Sénégal

² Doctorante, Ecole doctorale Espaces, Sociétés, Humanités, Laboratoire de recherche en sciences économiques et sociales, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal

Résumé

La crise sanitaire de la pandémie Covid-19 a profondément affecté l'économie touristique locale, celle de la Petite Côte, deuxième pôle touristique du Sénégal, après Dakar. L'objectif de cette étude est d'analyser la perception des impacts socio-économiques de la Covid-19 sur le secteur touristique de la Petite Côte. L'approche méthodologique mixte utilisée, arrimée à la triangulation interroge les acteurs locaux sur leur perception des impacts de la crise sanitaire sur le secteur touristique de cette dernière. Les résultats montrent entre autres, une chute de la fréquentation touristique de 85%, une fermeture des établissements du même nom (75%) et une perte de revenus des ménages de 65%. Face à cette situation, ces derniers ont mis en place des stratégies pour faire face à la crise. Parmi celles, la reconversion vers d'autres activités comme l'agroalimentaire (27,8%), l'informel (16,3%), et la pluriactivité numérique (14%) occupant une place privilégiée. Ces activités de reflètent une logique de « pauvreté dynamique » et non une transformation économique consolidée dans une perspective de restructuration durable du secteur touristique et des économies locales, assujetties.

Mots clés : Perception, Tourisme, Impacts socio-économiques, Covid-19, Sénégal

Perception of socio-economic impacts and resilience strategies of tourism in the face of Covid-19 (Petite Côte-Senegal)

Abstract

The COVID-19 pandemic has profoundly affected the local tourism economy of the Petite Côte, Senegal's second-largest tourist destination after Dakar. The objective of this study is to analyze the perception of the socio-economic impacts of COVID-19 on the tourism sector of the Petite Côte. The mixed-methods approach, based on triangulation, surveyed local stakeholders about their perception of the pandemic's impact on the region's tourism sector. The results show, among other things, an 85% drop in tourist numbers, the closure of tourism establishments (75%), and a 65% loss of household income. Faced with this situation, these stakeholders implemented strategies to cope with the crisis. Among these strategies, diversifying into other activities, such as agri-food (27.8%), the informal sector (16.3%), and digital diversified employment (14%), played a significant role. These activities reflect a logic of "dynamic poverty" and not a consolidated economic transformation with a view to the sustainable restructuring of the tourism sector and the local economies affected.

Keywords: Perception, Tourism, Socio-economic impacts, Covid-19, Senegal

¹ Corresponding author: imbaye@univ-zig.sn

1- INTRODUCTION

La pandémie de Covid-19 a engendré une rupture historique dans l'évolution du tourisme mondial. Si le secteur avait déjà été affecté par des crises sanitaires, économiques ou géopolitiques, aucune n'avait provoqué une interruption simultanée et prolongée des mobilités à l'échelle planétaire. En 2020, plus de 90 % des pays ont instauré des restrictions partielles ou totales aux voyages internationaux [1], entraînant un arrêt quasi systématique des flux touristiques durant plusieurs mois. Les arrivées internationales sont passées de 1,5 milliard en 2019 à environ 400 millions en 2020, soit une chute historique de 74 % [2]. Cette baisse sans précédent a entraîné une perte estimée à 4 500 milliards de dollars US pour l'économie mondiale, représentant près de la moitié de la contribution habituelle du tourisme au Produit Intérieur Brut (PIB) mondial [3].

Le Fonds monétaire international [4] souligne que le commerce mondial des services liés au tourisme a reculé d'environ 63 % en 2020, illustrant l'ampleur de la paralysie des mobilités internationales. Les impacts sur l'emploi étaient aussi drastiques. Selon l'Organisation Internationale du Travail [5], plus de 62 millions d'emplois ont été supprimés dans le secteur touristique à l'échelle mondiale en 2020, affectant prioritairement les travailleurs précaires, saisonniers, jeunes et femmes. Cette dimension sociale souligne le caractère systémique de la crise, qui ne s'est pas limitée aux indicateurs macroéconomiques mais a profondément fragilisé les structures sociales des destinations touristiques. La Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement [6] estime que les pertes cumulées du tourisme international entre 2020 et 2021 pourraient dépasser 4 000 milliards de dollars en termes de PIB mondial, en intégrant les effets directs, indirects et induits sur les secteurs connexes (transport, agriculture, commerce, culture). Les économies insulaires et les pays fortement dépendants du tourisme ont enregistré des contractions particulièrement sévères, parfois supérieures à 10 % du PIB en 2020.

Ainsi, les destinations d'Europe du Sud, des Caraïbes et d'Asie du Sud-Est, fortement dépendantes du tourisme international de loisirs, ont subi les baisses les plus marquées. À l'inverse, certains grands marchés intérieurs comme la Chine ou les États-Unis ont partiellement amorti le choc grâce au tourisme domestique, qui a joué un rôle de substitution temporaire [7]. Le tourisme d'affaires et événementiel a été particulièrement affecté : la généralisation des réunions virtuelles et du télétravail pourrait entraîner une baisse durable de 20 à 30 % des voyages d'affaires internationaux par rapport aux niveaux pré-pandémiques [8].

Le Sénégal a enregistré son premier cas de Covid-19 le 2 mars 2020 [9]. L'industrie touristique, levier important du développement économique et social du pays était fortement impacté. Avant la crise sanitaire de la Covid-19, elle contribuait de manière importante à la création de richesses et d'emplois dans plusieurs domaines, notamment dans l'hôtellerie, la restauration, les services de transport et la culture. Elle représente ainsi 6 à 7 % du PIB et mobilise plusieurs centaines de milliers d'emplois directs et indirects. De surcroît, le tourisme a un rôle structurant dans la dynamisation des territoires, la valorisation du patrimoine et l'intégration des économies locales [10]. Malheureusement, la pandémie de la Covid-19 a brisé l'élan de ces dernières. La Petite Côte, deuxième destination touristique nationale, n'a pas échappé à la nouvelle donne. La fermeture des frontières, la suspension des vols internationaux et les restrictions de déplacement ont provoqué un effondrement brutal du flux touristique, un rétrécissement sévère du chiffre d'affaires et un désordre profond de la chaîne de valeur du secteur.

Nombreuses ont été les entreprises touristiques qui ont dû suspendre ou arrêter leurs activités, tandis que les travailleurs, en particulier ceux qui opèrent dans l'économie informelle, ont vu leurs conditions de vie se précariser fortement [11]. Ce phénomène a mis en lumière non seulement la vulnérabilité économique du secteur mais aussi la vulnérabilité sociale du territoire fortement tributaire du tourisme. Ainsi, la Covid-19 ne peut être analysée comme une simple perturbation conjoncturelle. Elle constitue une crise systémique ayant mis en lumière la dépendance structurelle du tourisme Sénégalais aux mobilités internationales, la vulnérabilité des destinations mono-spécialisées et les limites d'un modèle intensif en circulation globale. La crise a simultanément ouvert un espace de réflexion sur la diversification des marchés, la relocalisation partielle des stratégies touristiques et l'intégration des concepts de durabilité et de résilience dans la gouvernance du secteur. L'objectif de cette étude est d'analyser la perception des impacts socio-économiques de la Covi-19 sur le secteur touristique de la Petite Côte.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Cadre d'étude

La Petite Côte constitue l'une des principales zones touristiques du Sénégal (Fig. 1). Au regard de ses potentialités touristiques, elle occupe le second rang de ces dernières après Dakar.



Fig. 1 - Principales zones touristiques au Sénégal

Source - Eldorado Lodge, 2023

La structuration géographique de la Petite Côte, correspond au littoral atlantique, au sud de Dakar, allant de Bargny à l'île de Fadiouth. Elle couvre les localités les plus emblématiques du tourisme balnéaire Sénégalais : Toubab Dialaw, Popenguine, Somone, Ngaparou, Saly, Mbour et Warang (Fig. 2).

LA PETITE CÔTE AU SÉNÉGAL



Fig. 2 - Petite Côte au Sénégal

Source - Eldorado Lodge, 2023

Sur le plan administratif, la Petite Côte relève essentiellement du département de Mbour, dans la région de Thiès [12]. L'insertion du nouvel Aéroport International Blaise-Diagne à proximité de Ndiass (AIBD) souligne le rôle stratégique de cette infrastructure dans l'accessibilité et le renforcement de l'attractivité de la destination.

Le développement touristique de la Petite Côte s'est amorcé dès les années 1970, dans le cadre d'une politique d'aménagement balnéaire impulsée par l'État sénégalais, visant à structurer une offre tournée vers les marchés européens. Saly Portudal s'est progressivement imposée comme la principale station balnéaire du pays, concentrant une part significative des établissements classés, des résidences touristiques et des infrastructures de loisirs. Avant la pandémie, la zone de Mbour-Saly regroupait une proportion importante des capacités d'hébergement formelles du Sénégal. L'économie locale s'est ainsi fortement spécialisée autour du tourisme balnéaire, entraînant la structuration d'une chaîne de valeur articulant hôtellerie, restauration, transport, artisanat, pêche artisanale et activités culturelles.

Au-delà du segment balnéaire, la Petite Côte dispose également d'un patrimoine naturel et culturel diversifié. La lagune de la Somone, classée réserve naturelle communautaire, constitue un site d'écotourisme reconnu.

2.2. Collecte des données

La collecte des données socio-économiques est effectuée à partir de la documentation existante. De surcroît, une enquête-ménage, des entretiens semi-directifs auprès des acteurs du tourisme, des touristes et des entretiens avec personnes ressources institutionnelles (Direction de la Réglementation Touristique, SAPCO (Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes) ont été aussi réalisés. Cette triangulation des données ou utilisation de plusieurs sources permet de réduire les biais et obtenir une compréhension plus complète et diversifiée des données.

Pour une population de 245 147 habitants de la Petite Côte [12], l'enquête de terrain est réalisée auprès de 163 ménages, obtenus à partir d'une méthode d'échantillonnage aléatoire simple avec correction pour population finie. Pour cela, nous avons utilisé la formule de COHEN suivante :

$$n = [N \times Z^2 \times p(1-p)] / [e^2(N-1) + Z^2 \times p(1-p)]$$

Avec :

- $N = 245\,147$
- $Z = 1,28$ (niveau de confiance de 80 %)
- $p = 0,5$
- $e = 0,05$

Application numérique :

$$n = [245\,147 \times (1,28)^2 \times 0,5(1-0,5)] / [(0,05)^2(245\,147-1) + (1,28)^2 \times 0,5(1-0,5)]$$

Calcul :

- $(1,28)^2 = 1,6384$
- $0,5(1-0,5) = 0,25$
- $(0,05)^2 = 0,0025$

Donc :

$$n = [245\,147 \times 1,6384 \times 0,25] / [0,0025(245\,147-1) + 1,6384 \times 0,25]$$

Résultat :

$$n \approx 163,84 \approx 164$$

Ainsi, la taille minimale requise de l'échantillon est de 164 ménages. Cette méthode d'échantillonnage a été choisie pour assurer une représentativité précise des perceptions des impacts socio-économiques de la Covid-19 sur le tourisme à Dakar. Cette méthode garantit que chaque individu de la population cible a une probabilité égale d'être sélectionné, réduisant ainsi les biais de sélection. La correction pour population finie est appliquée pour ajuster la taille de l'échantillon, car la population n'est pas infinie et une partie importante peut être incluse dans l'échantillon, ce qui améliore la précision des résultats. Cette approche permet de maximiser la fiabilité des données recueillies tout en respectant les normes statistiques rigoureuses. Les entretiens concernent 27 touristes, 03 agences de voyages, 01 tour opérateur (entreprise qui excelle dans le tourisme, combinant transport, hébergement et activités à un prix tout compris), 05 guides touristiques, 04 restaurants, 13 hôtels, 02 auberges et 02 bars. Les données sanitaires (cas et décès de Covid-19) sont collectées à partir du site internet via l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pand%C3%A9mie_de_Covid19_aus%C3%A9n%C3%A9a#2020. Il s'agit de données agrégées à l'échelle nationale, autrement dit, les données spécifiques à la Petite Côte ne sont pas disponibles à notre portée.

2.3. Traitement et analyse des données

Les données collectées de l'enquête-ménage et les entretiens sont traitées et analysées avec Excel et NVivo et la mise en forme (tableau...) avec Word. L'analyse repose sur une méthodologie mixte combinant des approches quantitatives et qualitatives (Fig. 3).

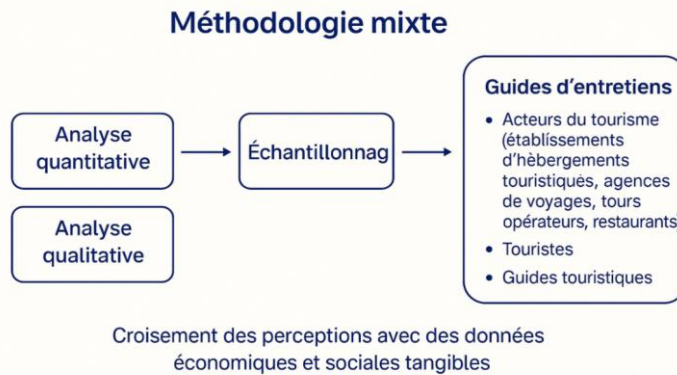


Fig. 3 - Méthode mixte combinant une analyse quantitative et qualitative

Source : Mariama Dia, 2026

Ce choix méthodologique vise à croiser les perceptions des acteurs avec des données économiques et sociales observables, afin d'obtenir une lecture plus complète des effets de la crise sanitaire sur le secteur touristique.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Description du tableau pathologique de la Covid-19 au Sénégal en 2020

La description du tableau pathologique de la Covid-19 (cas et décès) s'est effectuée en fonction des données disponibles et accessibles (mars-juin 2020). La situation sanitaire de cette période montre à l'échelle nationale que le mois de mai 2020 s'individualise avec la morbidité la plus élevée (72 254 cas de Covid-19), soit une proportion de 61,01%. Il s'en suivit, respectivement les mois de juin (32 687 cas, soit 27,58%), d'avril (12 025 cas, soit 10,14%) et enfin mars avec la proportion la plus faible de la morbidité de la Covid-19 (1,27%), soit 1 516 cas en valeur absolue (tableau 1). En effet, le mois de mars inaugure la pandémie au Sénégal c'est la raison pour laquelle les cas de Covid-19 sont plus faibles pendant ce mois. En revanche, l'augmentation rapide des cas constatée pendant les autres mois est due à l'ignorance de la maladie au début de la pandémie par le personnel de santé afin de la contenir. De surcroît, les stratégies restrictives mises en place par l'Etat (confinement, état d'urgence, port du masque, limitation du nombre de passagers dans les transports en commun et les lieux de rassemblements...) n'étaient pas respectées scrupuleusement. Par ailleurs, l'absence de vaccin pendant la période étudiée, justifie le taux de létalité 1,05% enregistré avec des disparités mensuelles de 0,06% au mois de mars à 1,11% au mois de juin, 0,97% au mois d'avril et 1,06% au mois de mai 2020 (tableau 1).

Tableau 1 - Evolution mensuelle des cas et des décès de Covid-19 au Sénégal de mars à juin 2020

Mois	Cas de Covi-19	Proportion des Cas (%)	Décès	Taux de létalité (%)
Mars	1 516	1,27	1	0,06
Avril	12 025	10,14	117	0,97
Mai	72 254	61,01	767	1,06
Juin	32 687	27,58	365	1,11
Total	118 482	100	1 250	1,05

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pand%C3%A9mie_de_Covid-19_au_S%C3%A9n%C3%A9gal#2020

Le taux de létalité exprime la proportion de décès dans une population malade. C'est un indicateur de la gravité de la maladie et sa virulence. Le taux de létalité traduit le rapport du nombre de décès aux cas de Covid-19 X 100.

3.2. Description des activités liées au tourisme dans la Petite Côte

L'hôtellerie et la restauration apparaissent comme les principales activités des ménages, arimées au secteur touristique, avec 26,6% des observations (Fig. 4). Cela confirme leur rôle structurant dans l'économie touristique locale. Cette prédominance n'est pas surprenante, dans la mesure où ces activités constituent l'interface directe entre visiteurs et territoire.

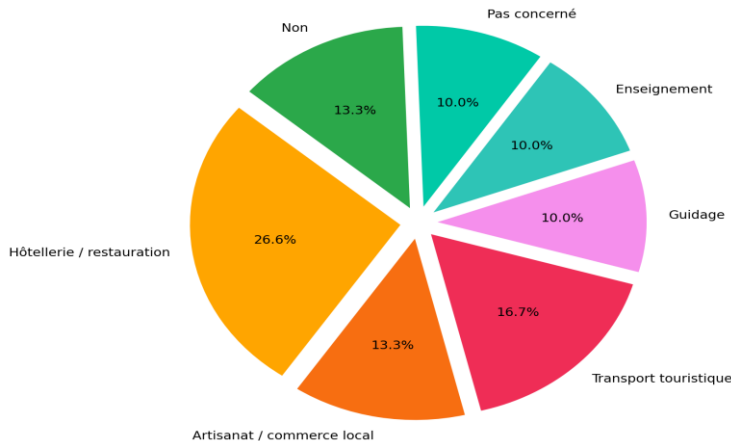


Fig. 4 - Activités des ménages liés au tourisme dans la Petite Côte

Source : Enquête-ménages, Mariama Dia (2023-2024)

Les secteurs de l'artisanat et du commerce local (13,3%), ainsi que celui du transport touristique (17%), témoignent l'importance des fonctions d'accompagnement. Ces activités, illustrent le caractère diffus de l'économie touristique, qui ne se limite pas aux hôtels ou aux agences structurées, mais mobilise une pluralité d'acteurs insérés dans des chaînes de services plus larges. La présence des métiers du guidage (10 %) et de l'enseignement (10 %) rappelle également que le tourisme active des compétences variées, qu'elles soient culturelles, linguistiques ou pédagogiques. Ces fonctions, moins visibles que l'hôtellerie, contribuent pourtant à la qualité de l'expérience touristique et à l'ancrage local de l'activité. Il convient toutefois de noter qu'une proportion non négligeable de ménages 23,3% si l'on regroupe les catégories « pas concerné » et « non » demeure en marge de ces dynamiques. Ce chiffre invite à relativiser l'idée d'une diffusion homogène des plus-values du tourisme. L'activité génère des opportunités, certes, mais celles-ci ne se répartissent pas de manière uniforme au sein des communautés locales.

3.3. Impacts socio-économiques de la Covid-19 sur le tourisme dans la Petite Côte

La Petite Côte concentre plus de 40 % de la capacité hôtelière nationale. Cela lui confère le statut d'un pôle majeur de l'activité touristique du pays [12]. Au-delà des infrastructures hôtelières, l'économie touristique de la Petite Côte s'appuie également sur un réseau dense d'acteurs locaux. Campements touristiques, artisans, restaurants traditionnels, guides locaux ou encore pêcheurs reconvertis dans les activités touristiques participent à la dynamique économique de la zone. Avant la crise sanitaire, les flux touristiques étaient estimés à plus de 400 000 visiteurs par an [13], générant des revenus relativement importants pour les collectivités territoriales et pour les populations locales. L'apparition de la pandémie Covi-19 a toutefois profondément perturbé cette dynamique. La fermeture des frontières et la suspension des liaisons aériennes ont entraîné une chute brutale de la demande touristique. De nombreux hôtels ont été contraints de fermer temporairement ou de fonctionner avec une activité très réduite pendant plusieurs mois. Parallèlement, les activités informelles liées au tourisme telles que la vente d'objets artisanaux, les excursions ou les circuits touristiques ont été fortement ralentis, affectant directement les revenus de nombreux ménages qui dépendent de ces activités. Ainsi, le taux de fréquentation hôtelière est passé sous la barre des 20 % au cours du second semestre 2020 [12].

3.3.1. Une économie locale fragilisée et dualisée

L'analyse des données recueillies à partir de l'enquête-ménages mettent en évidence un approfondissement des inégalités économiques durant la période pandémique. La différenciation sociale des impacts de la crise de la Covi-19 est nettement perceptible sur l'emploi touristique. Les pertes d'emplois ne sont homogènes. En effet, 45 % des

hommes interrogés déclarent avoir perdu leur emploi contre 58% des femmes et 63% des jeunes de moins de 35 ans (Fig. 5).

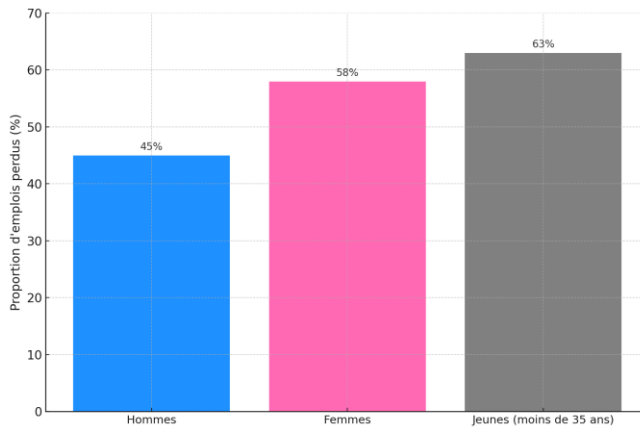


Fig. 5 – Impact de la COVID19 sur l'emploi de la Petite Côte
Source - Enquête-ménages, Mariama Dia (2023-2024)

Cette situation s'explique par la structure même du marché du travail touristique. Les femmes occupent majoritairement des emplois dans la restauration, le petit commerce et l'hôtellerie de proximité, des secteurs fortement exposés aux fermetures et aux réductions d'activité. Les jeunes, pour leur part, sont surreprésentés dans les emplois saisonniers et informels (guides indépendants, animateurs culturels, serveurs), généralement sans contrat ni couverture sociale, ce qui les a rendus particulièrement vulnérables à l'arrêt brutal des flux touristiques. Ainsi, la figure 5 ci-dessus illustre clairement une accentuation des inégalités sociales engendrées par la pandémie : les groupes déjà précarisés dans le secteur touristique (femmes et jeunes) ont été les plus fragilisés, renforçant leur marginalisation économique et sociale. Les conséquences économiques de la crise ont été encore plus marquées en raison de la forte dépendance de la zone au tourisme balnéaire international. L'arrêt des arrivées en provenance des marchés européens, qui représentaient une part importante de la clientèle, a provoqué une quasi-paralysie des stations balnéaires telles que Saly, Somone, Popenguine et Joal-Fadiouth.

Les structures de petite taille (auberges familiales, campements touristiques et restaurants locaux) ont été particulièrement exposées, en raison de leur ancrage dans l'économie informelle. Les résultats obtenus à cet effet, indiquent que 75% des établissements situés sur la Petite Côte étaient fermés, suite à une chute de 85% de la fréquentation touristique. Dans un contexte de dépendance au tourisme international de 90% et une capacité de résilience faible (35%), les établissements ont enregistré une perte de 80% des emplois. Il en est de même pour les ménages qui ont perdu 65% de leurs revenus (Fig. 6).

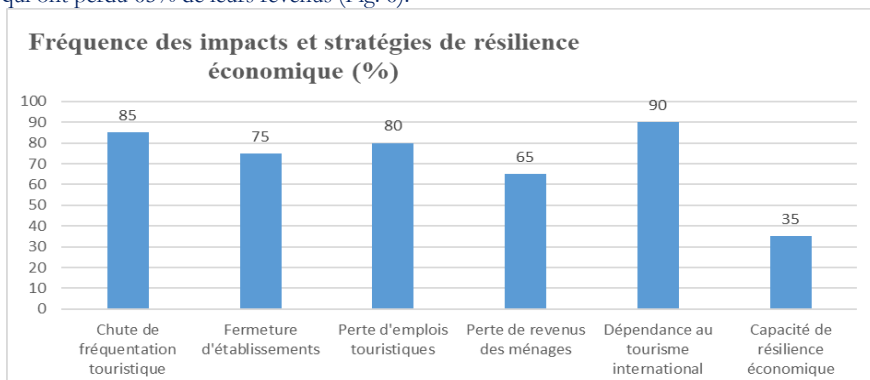


Fig. 6 - Impacts socio-économiques et stratégies de résilience du secteur touristique face à la Covid-19 dans la Petite Côte

Source : Enquête-ménages, Mariama Dia (2023-2024)

Cette situation s'explique en grande partie par la spécialisation touristique de la Petite Côte, largement orientée vers le tourisme balnéaire international. La dépendance importante à une clientèle étrangère, en particulier européenne, a rendu ce territoire particulièrement sensible aux restrictions de mobilité internationale et à la fermeture prolongée des frontières durant la crise sanitaire. Dans ce contexte de détresse économique, on assiste à des reconversions professionnelles de la population vers d'autres activités (agriculture périurbaine, la pêche et le petit commerce informel, entre autres).

3.4. Stratégies de résilience face aux impacts socio-économiques de la Covid-19 sur le tourisme dans la Petite Côte

La pandémie de Covi-19 a constitué une épreuve sans précédent pour l'économie touristique sénégalaise. L'arrêt brutal des flux internationaux, les fermetures d'établissements, et la désorganisation des circuits traditionnels ont imposé aux acteurs du secteur une nécessité de réagir, souvent dans l'urgence et avec des moyens limités. Cette rubrique met en lumière la créativité des acteurs de base, la mobilisation des structures collectives, les limites des politiques publiques et les blocages structurels qui freinent l'émergence d'une véritable résilience systémique.

3.4.1. Diversification économique des acteurs

La crise engendrée par la pandémie de Covid-19 a mis en évidence la vulnérabilité structurelle de nombreuses activités liées au tourisme au Sénégal. Cette fragilité s'est particulièrement manifestée dans la Petite Côte, dont l'économie touristique repose largement sur la fréquentation internationale et sur une forte saisonnalité de la demande.

L'interruption soudaine des flux de visiteurs a profondément perturbé la zone, révélant la dépendance du secteur à des facteurs exogènes difficilement maîtrisables.

Dans ce contexte, les acteurs du tourisme ont mis en place des stratégies de diversification de leurs activités afin de limiter les pertes économiques et de maintenir leurs moyens de subsistance. Ces initiatives visaient principalement à générer des revenus alternatifs, même modestes, afin d'assurer une continuité minimale de l'activité économique et de renforcer leur capacité d'adaptation face à une crise prolongée.

3.4.1.1. Une économie touristique contrainte à la reconversion

Les dynamiques de reconversion peuvent être regroupées en trois entités principales : les *activités agroalimentaires et commerce informel*, la pluriactivité numérique et artisanale et enfin la diversification intra-sectorielle et le repositionnement de l'offre touristique.

3.4.1.2. Activités agroalimentaires et commerce informel

Certains restaurateurs, tenanciers de bars et gestionnaires d'auberges, en particulier dans les localités périphériques de la Petite Côte (notamment Joal, Popenguine et Mbour), ont opéré un glissement vers d'autres activités. Parmi ces dernières figurent la vente de produits agricoles, la transformation alimentaire artisanale (jus locaux, condiments) et le commerce de biens de première nécessité. Ces reconversions relèvent souvent de la survie économique et traduisent une forme d'ancrage territorial réactif face à la crise.

3.4.1.3. Pluriactivité numérique et artisanale

Dans un contexte de réduction drastique des flux touristiques étrangers, quelques guides indépendants et agents de voyages ont tenté de réorienter leurs compétences vers la production artisanale (bijoux, objets culturels) et leur commercialisation via les réseaux sociaux. Bien que ces initiatives restent minoritaires en termes de volume économique, elles témoignent une tentative de valorisation du patrimoine dans un espace numérique élargi, signe d'une résilience créative.

3.4.1.4. Diversification intra-sectorielle et repositionnement de l'offre touristique

Certains hôtels, en particulier dans les zones balnéaires de Saly, Ngaparou et Warang, ont modifié leur modèle économique pour cibler une clientèle nationale ou sous-régionale. Cette stratégie a consisté à proposer des formules intéressantes avec des séjours de longue durée, assortis d'espaces de *coworking*, adaptés aux restrictions sanitaires. Cette forme de diversification, inscrite dans le même champ d'activité, traduit une volonté de réduction de la dépendance à la haute saison touristique, étrangère et marque une tentative de reconfiguration du modèle d'exploitation touristique local. Ainsi, la pandémie n'a pas seulement interrompu l'activité économique. Elle a agi aussi comme un catalyseur de recompositions professionnelles, obligeant les acteurs à explorer des formes alternatives de subsistance et à repenser leurs rapports au territoire, aux clientèles et à la temporalité touristique.

La Fig. 7 met en évidence la structure des stratégies de reconversion adoptées par les ménages durant la pandémie de Covid-19 dans la Petite Côte. Son analyse révèle une prédominance des ajustements orientés vers la subsistance immédiate plutôt que vers une transformation productive structurée. En effet, 27,8% des réponses concernent un

investissement dans l'agriculture ou le jardinage. Cela traduit un repli vers des activités à faible barrière d'entrée visant avant tout la sécurisation alimentaire et la réduction de la dépendance monétaire.

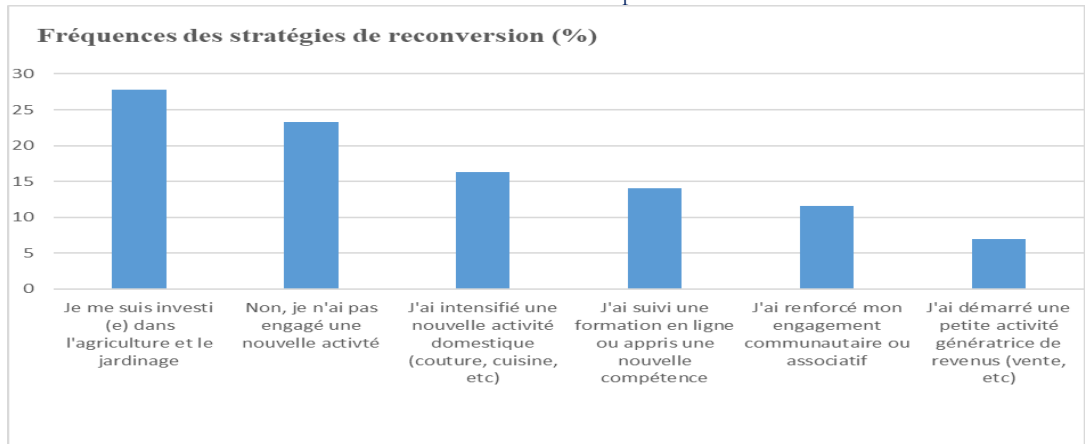


Fig. 7 - Répartition des stratégies de reconversion professionnelle adoptées par les ménages durant la Covid-19 dans la Petite Côte

Source - Enquête-ménages, Mariama Dia (2023-2024)

Par ailleurs, 23,3% des répondants déclarent n'avoir engagé aucune nouvelle activité. Cela met en lumière l'existence de contraintes structurelles limitant les capacités d'adaptation, qu'elles soient financières, institutionnelles ou liées au capital humain. Cette proportion relativement appréciable montre que la reconversion n'a pas été une option accessible à tous, renforçant ainsi les inégalités socio-économiques préexistantes. Les stratégies intermédiaires intensification d'activités domestiques (16,3%) et acquisition de nouvelles compétences via la formation (14%) traduisent une tentative d'ajustement adaptatif, sans pour autant constituer un véritable repositionnement professionnel. Elles relèvent davantage d'une optimisation des ressources existantes que d'un changement structurel du modèle économique des ménages. Enfin, seules 7 % des réponses indiquent le démarrage d'une activité génératrice de revenus. Cela confirme le caractère marginal des initiatives entrepreneuriales structurées. Cette faiblesse relative du micro-entrepreneuriat productif corrobore l'hypothèse d'une « résilience défensive », centrée sur la survie à court terme plutôt que sur une dynamique d'accumulation ou de requalification durable.

Au total la figure 7 ci-dessus illustre empiriquement une logique de « pauvreté dynamique », caractérisée par une oscillation entre micro-ajustements et maintien dans l'informalité, sans transition vers une transformation économique consolidée. Elle confirme qu'en l'absence de dispositifs d'accompagnement ciblés, la reconversion professionnelle demeure largement contrainte et transitoire, limitant les perspectives de restructuration durable du secteur touristique et des économies locales qui en dépendent.

3.5. Discussion

La pandémie de la Covid-19 a fortement impacté l'industrie touristique locale de la Petite Côte. Les résultats obtenus à cet effet, indiquent une chute de la fréquentation touristique (85%), une fermeture des établissements touristiques à hauteur de 75% et une perte de revenus des ménages de 65%. Le tout ponctué par une faible capacité de résilience de 35%,

La baisse de la fréquentation touristique, induite par la Covid-19 est confirmé par la Banque Mondiale [1]. En effet comme le souligne cette dernière, le nombre de visiteurs internationaux est ainsi passé d'environ 1,7 million à près de 500 000 en 2020, soit une diminution estimée à près de 70 %. La fermeture des établissements touristiques qui associe les pertes d'emplois, de revenus des ménages sont corroborées par les études de [14] qui soulignent que la crise sanitaire de la Covid-19 a agi comme un choc qui a significativement éprouvé les Pays en Développement. Elle a mis en évidence la fragilité socio-économique d'un grand nombre d'acteurs touristiques, mais également celle des populations locales dont les moyens d'existence dépendent largement de cette activité. La Covid-19 a révélé les vulnérabilités structurelles des systèmes touristiques fortement dépendants des flux internationaux [14]. Dans le cas du Sénégal, la pandémie a ainsi mis en lumière les limites d'un modèle historiquement tourné vers l'extérieur, spatialement concentré et encore insuffisamment intégré aux dynamiques économiques locales [11]. Dans la même veine, la pandémie de la Covid-19 a fortement impacté l'économie locale, celle du marché de « Saint Maurice » de la

commune de Ziguinchor au point d'accroître drastiquement la vulnérabilité socio-économique des populations [15]. Les externalités négatives de la pandémie sur les populations étaient manifestes en termes de pertes partielles ou totales de revenus, dans un contexte de précarité et de dénuement [15].

Au Sénégal, notamment dans les zones touristiques à l'image de la Petite Côte, le système de transport des produits alimentaires était très affecté. Il en était de même au Canada [16]. En Tunisie [17] révèle dans son étude que les populations les plus démunies ne pouvaient plus avoir accès aux denrées alimentaires à cause de l'inflation. Le rapport de la CEDEAO intitulé «*Pandémie Covid-19 : impact des mesures de restriction en Afrique de l'Ouest*» confirme cette situation de précarité. Il souligne que «*l'impact sur le revenu est plus sévère pour les personnes qui dépendent de sources de revenu instables et précaires, notamment les petits commerçants, les vendeurs de la rue et les travailleurs occasionnels* » [10]. Ainsi, la pandémie Covid-19 a mis en évidence la vulnérabilité de la chaîne de production et d'approvisionnement au Sénégal.

A Ziguinchor, au Sud du Sénégal, la pandémie Covid-19 avait sérieusement affecté la campagne de commercialisation des noix de cajou. En moyenne la commune avait perdu 30 millions de F CFA [18] sans compter le chômage technique des acteurs de la filière [19] et la chute des prix des noix brutes de cajou avec l'absence des acheteurs indiens au Sénégal. Ces résultats sont confirmés par les études de [20], de [21] et de [22] qui ont convoqué les aléas en tant que facteurs bloquants du bon fonctionnement de la campagne de cajou.

Les résultats obtenus au niveau des stratégies de résilience du secteur touristique de la Petite Côte montrent l'accompagnement de l'Etat du Sénégal qui était venu à la rescousse des entreprises touristiques, du secteur informel, de la reconversion vers d'autres activités et la diversification de l'offre. Comme l'ont souligné [23, 24, 25], la résilience d'un secteur dépend largement de son niveau de diversification, de son ancrage territorial et de la qualité de sa gouvernance à différente échelle. Cela signifie que le renforcement de la résilience des acteurs par les Etats face aux vulnérabilités spécifiques des différentes localités attractives du continent africain [26, 27, 28], doit s'inscrire dans une perspective de durabilité du secteur touristique [29].

CONCLUSION

La pandémie de la Covid-19 a impacté négativement l'industrie touristique de la Petite Côte. La chute de la fréquentation touristique a engendré une fermeture des établissements du même nom et une perte significative de revenus des ménages. Face à ce contexte délétère, l'Etat du Sénégal, à l'image de tous les Etats Africains, à accompagner la résilience des entreprises du secteur. Par ailleurs, les populations ont mis en place une panoplie des stratégies pour faire face aux externalités négatives de la pandémie. Il s'agit notamment, de la reconversion vers d'autres activités comme l'agroalimentaire, le commerce informel et la pluriactivité numérique et artisanale, entre autres. Cette diversification des stratégies de reconversion montre la prégnance des ajustements orientés vers la subsistance avec 27,8% de la population interrogée reconvertie vers l'agriculture ou le jardinage. La proportion de la population réorientée vers la couture et les activités domestique telles la cuisine est 16,3%, contre 14% pour l'acquisition de nouvelles compétences (formation en ligne) et 7 % pour la proportion de la population qui démarre une petite activité génératrice de revenus (vente...). Ces activités de reconversion traduisent une logique de «*pauvreté dynamique* », caractérisée par une oscillation entre micro-ajustements et maintien dans l'informalité, sans transition vers une transformation économique consolidée. Elles confirment qu'en l'absence de dispositifs d'accompagnement ciblés, la reconversion professionnelle demeure largement contrainte et transitoire, limitant les perspectives de restructuration durable du secteur touristique et des économies locales qui en dépendent.

Références bibliographiques

- [1] Banque Mondiale, De la crise à une reprise verte, résiliente et inclusive. Rapport annuel, (2021), 122 p.
- [2] Organisation Mondiale du Travail (OMT), Conclusions et recommandations de la commission de l'OMT pour l'Afrique à sa soixante-cinquième réunion Arusha (République-Unie de Tanzanie), octobre. Rapport, (2022), 15 p.
- [3] WTTC [World Travel and Tourism Council], Global Economic Trends and Impact. World Travel and Tourism Council, London. <https://wttc.org/Portals/0/Documents/Reports/2021/Global%20Economic%20Impact%20and%20Trends%2021>.
- [4] Fonds Monétaire International (FMI), Une année sans pareille. Rapport annuel, (2021), 68 p.
- [5] Organisation Internationale du Travail (OIT), Finance Solidaire. Rapport annuel (2023), 54 p.
- [6] Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (CNUCED), De la reprise à la résilience : la dimension du développement. Rapport sur le commerce et le développement. 40^e édition, Nations Unies, (2021), 217 p.
- [7] P. Thourot, La nouvelle donne. Rapport OCDE, (2020), 48 p.
- [8] MC, Kinsey, Covid-19 and gender equality: Countering the regressive effects. Global Institute, (2020), 11 p.
- [9] Ministère de la Santé et de l'Action Sociale (MSAS), Covid-19 au Sénégal Faits & Chiffre. Revue Hebdomadaire Santé-Mercredi, Mai, 52, (2021), 25 p.
- [10] Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), Pandémie de la Covid-19, impact des mesures de restriction en Afrique de l'Ouest. <https://ecowas.org/>, (2020), 128 p.

- [11] M. Diombera, Le tourisme à Saly face à la crise sanitaire de la Covid-19 : Bilan et perspectives. *Études caribéennes*, 48, (2021), 47-50
- [12] Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), Annuaire statistique régional de Dakar. ANSD. Rapport, (2023), 666 p.
- [13] Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), Annuaire statistique régional de Dakar. ANSD. Rapport, (2018), 159 p.
- [14] S. Gossling D. Scott & MC. Hall, Pandemics, transformations and tourism. *Tourism Geographies*, 22(3), (2020), 577-598 <https://doi.org/10.1080/14616688.2020.1759131>
- [15] I. Mbaye, Vulnérabilités environnementale et socio-économique face à la Covid-19 dans la commune de Ziguinchor au Sénégal : Cas du marché de Saint-Maure. *Environnement et Dynamique des Sociétés (EDS)*, 11, Décembre, (2024), 269-280.
- [16] R. Gray, Agriculture, transportation, and the Covid-19 crisis, *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, (2020), 239-243 <https://doi.org/10.1111/cjag.12235>
- [17] M. Elloumi, L'agriculture tunisienne face à la Covid-19: impacts de la crise sanitaire et perspectives pour une agriculture résiliente. *Cahiers Agricultures*, (2020), 29-35, <https://doi.org/10.1051/cagri/2020032>
- [18] M. Ndiaye, Dynamiques des territoires ruraux au Sénégal : Culture de l'espèce *Anacardium occidentale* Linnaeus (anacardier) et stratégies de lutte contre la pauvreté dans les Départements de Foundiougne (Commune de Diossong) et Ziguinchor. Thèse de Doctorat unique en Géographie, UGB, (2020), 334 p.
- [19] JC., Kantousan, Estimation de la production de noix d'anacarde (noix d *Anacardium occidentale* L., 1753) : impacts socioéconomiques et environnementaux dans les terroirs de terembasse balante et terimbasse mancagne (commune de simbandi balante). Mémoire de Master 2 en Géographie, Université Assane SECK de Ziguinchor, (2019), 118 p.
- [20] NK Kouao et R. Styvince, Analyse des mutations géographiques liées à la culture de l'anacarde dans les sous-préfectures de Diabo, Botro et Bodokro (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat en Géographie, Université Félix Houphouët Boigny, (2020), 314 p.
- [21] S. Audouin, Systèmes d'innovation et territoires : un jeu d'interactions ; Les exemples de l'anacarde et du jatropha dans le sud-ouest du Burkina Faso. Thèse de Doctorat en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne, Paris I, (2014), 418 pages.
- [22] D. Soro, Couplage de procédés membranaires pour la clarification et la concentration du jus de pomme de cajou : performances et impacts sur la qualité des produits. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Université Montpellier Sup Agro, (2012), 156 p.
- [23] C. Bene, A. Newsham, M. Davies, M. Ullrichs, & R. Godfrey-Wood, Resilience, resilience capacity and humanitarian assistance. *IDS Working Papers*, 454 (2014) 1–59 <https://doi.org/10.1002/ijd.2992>
- [24] G. Bristow & A. Healy, Regional resilience. *Journal of Economic Geography*, 14, 5 (2014), 923–935. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbu009>
- [25] M. Dia, Perception des impacts socio-économiques de la Covid-19 sur le tourisme au Sénégal : cas de Dakar et de la Petite Côte. Mémoire de thèse, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, (2026), 306 p.
- [26] V. Ghadi, La résilience collective. *Management & Avenir*, 124, 6, (2021), 15-38. <https://doi.org/10.3917/mav.124.0015>
- [27] J. Saarinen, Traditions of sustainability in tourism studies. *Annals of Tourism Research*, 33(4), (2006), 1121-1140. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2006.06.007>
- [28] S. Ouattara, La chaîne des transports maritimes des ports ivoiriens à l'épreuve de la crise sanitaire du Covid-19 : Covid-19 en Afrique : Perceptions, enjeux, et gouvernance, *l'Harmattan Sénégal*, (2022), 299-311
- [29] S. Gossling, D. Scott & M.C. Hall. Pandemics, tourism and global change. *Journal of Sustainable Tourism*, 29,1, (2021) 1-20 <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1758708>

Evaluation de la qualité des eaux en sachet vendues dans la commune de Diffa au Niger

Salifou Issa^{1,2}, Toudjani Assane Anabi³, Abdourahamane Barry⁴, Zanguina Adamou⁵, Ibrahim Natatou⁵.

¹Laboratoire Polyvalent de l'Université de Diffa BP : 78 Diffa, Niger,

²Département Eau et Ressources Halieutiques, Institut Supérieur en Environnement et Ecologie, Université de Diffa, Niger,

³Département Eau et Environnement, Faculté des Sciences Agronomiques et Ecologiques, Université de Diffa, Niger,

⁴Département de Biologie, Faculté des sciences et techniques de l'université de Labé-Labé, République de Guinée,

⁵Département de Chimie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger,

Résumé

De nos jours pour des raisons de commodité les populations urbaines et même rurales utilisent beaucoup les eaux en sachet communément appelées "Pure Water" comme eau de boisson. Ces eaux bien que très utilisées présentent quelques fois des problèmes de qualité tant sur le plan physicochimique que microbiologique. En effet ces eaux proviennent dans une large majorité de forages implantés par les producteurs eux-mêmes et dont le suivi qualité est inexistant. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui consiste à déterminer l'état des caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des eaux pour conclure sur leur potabilité. Ainsi sur le plan physicochimique la détermination de l'IQE révèle que 90% des échantillons présentent des eaux d'excellente qualité, les 10% étant de mauvaise qualité. Sur le plan microbiologique 60% des échantillons présentent des coliformes totaux dont 40% des échantillons ont un taux inférieur à 100 UFC et les 20% des échantillons disposent d'un taux supérieur à 100 UFC. A cela il faut ajouter que 50% des échantillons présentent des coliformes fécaux dont 30% des échantillons ont un taux inférieur à 100 UFC et les 20% des échantillons disposent d'un taux supérieur à 100 UFC. La détermination de l'IQM révèle que 20% des échantillons présentent un IQM faible confirmant ainsi la présence d'une contamination fécale et le degré de pollution révélé par les paramètres microbiologiques. Ainsi chez 50% des producteurs, les eaux en sachet produites sont de très mauvaise qualité car la norme OMS recommande zéro coliforme fécal dans une eau de consommation, ce qui rendrait ces eaux impropres à la consommation humaine.

Mots clés : Eau en sachet, paramètres physicochimiques et microbiologiques, IQE, IQM, commune de Diffa au Niger

Quality assessment of water in bags sold in the municipality of Diffa, Niger

Abstract

Nowadays, for the sake of convenience, both urban and rural populations frequently consume water sold in sachets, commonly known as "Pure Water." Although widely used, this water sometimes presents quality issues regarding both physicochemical and microbiological parameters. Indeed, the vast majority of this water comes from boreholes drilled by the producers themselves, with no quality monitoring in place. This study was conducted against this backdrop to assess the physicochemical and microbiological characteristics of the water and determine its potability. Physicochemical analysis using the Water Quality Index (WQI) revealed that 90% of the samples were of excellent quality, while 10% were of poor quality. Microbiologically, 60% of the samples contained total coliforms: 40% showed levels below 100 CFU, and 20% showed levels above 100 CFU. Additionally, 50% of the samples contained fecal coliforms, with 30% showing levels below 100 CFU and 20% showing levels above 100 CFU. The Microbiological Quality Index (MQI) analysis showed that 20% of the samples had a poor MQI rating, confirming the presence of fecal contamination and the level of pollution indicated by the microbiological parameters. Consequently, the water produced by 50% of the manufacturers is of very poor quality; since WHO standards recommend zero fecal coliforms in drinking water, this renders the water unfit for human consumption.

Keywords: Water in bags, physicochemical and microbiological parameters, WQI, MQI, municipality of Diffa in Niger

¹ Corresponding author : sirete2000@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'eau est une ressource rare, partagée par toute l'humanité[1]. Dans la plupart des pays en développement l'accès à l'eau potable reste au centre des problèmes de santé publique[2]. Au Niger, l'accès à l'eau potable reste un souci majeur pour la population et le politique. Cependant, la couverture en eaux des populations demeure toujours faible[3].

Cette situation a conduit le Niger à l'instar des pays voisins à la commercialisation de l'eau par les secteurs privés dans le but de répondre aux besoins des ménages sans cesse croissant. C'est dans ce contexte que la vente d'eau par les fontainiers ainsi que la vente d'eau conditionnée en sachet communément appelée "Pure Water" ont vu le jour[3]. Ces eaux ont capté l'attention des consommateurs du fait de leur prix accessible, de leur facile disponibilité et du fait que le public pense que leur qualité est meilleure. Aujourd'hui une bonne partie de la population nigérienne utilise cette eau pour la boisson[3].

Mais de plus en plus, la qualité de cette eau est sujette à de multiples interrogations dont entre autres sa conformité aux normes de potabilité. Or l'usage d'une eau en sachet de faible qualité comme boisson peut causer aux populations des maladies hydriques[4].

En effet plusieurs études ont relevé la pollution des eaux par les microorganismes dont entre autres celles de Benajiba *et al.* [5] Soncy *et al.* [6], Hounsino *et al.* [7], Zerhouni *et al.* [8] et Issa. [9], mais aussi qui ont rapporté une contamination des eaux due à la présence de Coliformes totaux et de Coliformes thermotolérants ([9];[10]). D'après l'Organisation Mondiale de la Santé près de 500 millions d'individus subissent des maladies infectieuses d'origine hydrique, dont les 20 millions succombent, ce qui place au monde la qualité microbiologique de l'eau au premier rang des préoccupations de santé publique ([11]; [12]; [13];[9]).

Il apparaît clairement que les aspects qualitatif et hygiénique des eaux sont alors placés au second rang par certains producteurs et quelque fois ils ne sont même pas considérés.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude qui consiste à faire un état des lieux sur les qualités physicochimiques et microbiologiques des eaux en sachet produites dans la commune de Diffa au Niger.

2. MATERIEL ET METHODES

Pour le besoin de l'étude nous avons sélectionné dix (10) producteurs qui desservent la commune de Diffa. La figure 1 nous donne la répartition des différents producteurs de "pure water" retenus et dont les eaux ont été échantillonnées pour cette étude.

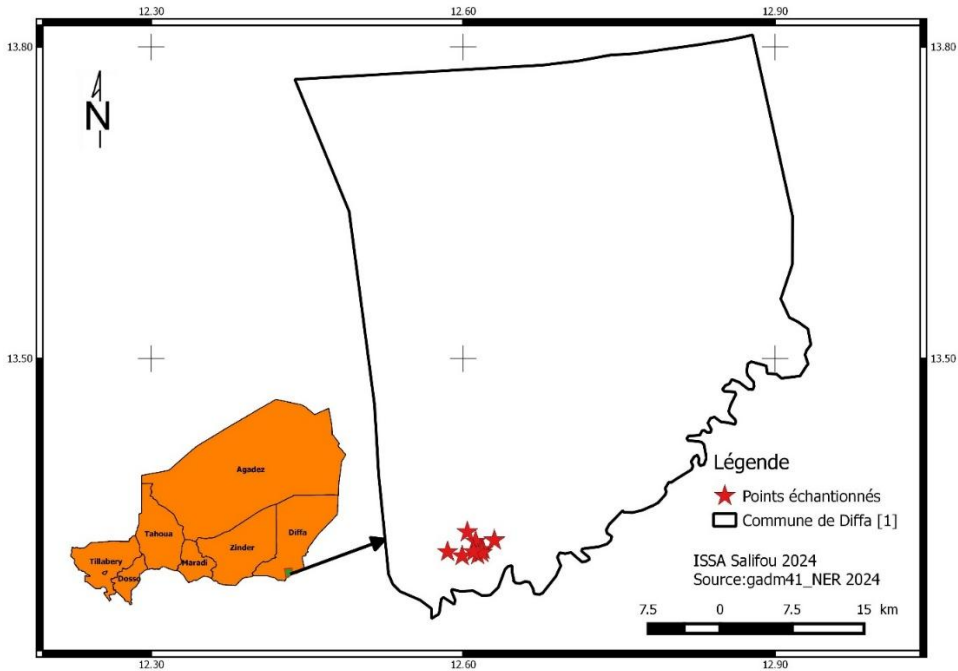


Figure 1 : Carte de la localisation géographique des producteurs de Pure water

Au cours de cette étude, les analyses effectuées portent sur les paramètres physicochimiques déterminés par potentiométrie, spectrophotométrie et volumétrie ainsi que les paramètres microbiologiques déterminés par la méthode de colimétrie sur membrane filtrante.

Le logiciel de diagramme est utilisé pour déterminer le faciès chimique des eaux. Les méthodes de traitement de données portent d'une part sur l'indice de la qualité de l'eau et d'autre part sur l'indication de la contamination fécale (Bovesse et Depelchin. 1980), appelée aussi indice de la qualité microbiologique (IQM).

La détermination de l'Indice de la Qualité de l'Eau (IQE) a été faite à partir de certains paramètres physiques et chimiques selon l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Avec :

Q_i : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre ;

W_i : le poids de chaque paramètre selon son importance relative dans la qualité des eaux de boisson.

Ainsi selon la valeur de l'IQE obtenue, les classes de qualité des eaux et leurs différents usages possibles sont définies conformément au Tableau 1.

Tableau 1: Variation de la qualité de l'eau selon son indice de qualité arithmétique pondérée (IQE).

Classe d'IQE	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
26-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
51-75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
76-100	Très Mauvaise qualité	Irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

L'indice de la qualité microbiologique (IQM) se calcule à partir des concentrations de l'eau en coliformes totaux et fécaux et ou E-coli.

Cinq (5) classes de concentrations sont définies pour chacun de ces paramètres (tableau 2). Cet indice est la moyenne des numéros des classes de chaque paramètre. Le niveau de pollution est donné selon cinq (5) classes de qualité (tableau 3) qui correspondent aux couleurs standards (figure 2).



Figure 2 : Classes de qualité correspondant aux couleurs standards.

Tableau 2 : Classes de qualité correspondant aux différents paramètres.

Classes	Bactéries Totales/ml	Coliformes fécaux/ml	Streptocoques fécaux/ml
5	< 2 000	< 100	< 5
4	2 000 – 9 000	100 -500	5 – 10
3	9 000 – 45 000	500 – 2 500	10 – 50
2	45 000 – 360 000	2 500 – 20 000	50 – 500
1	> 360 000	> 20 000	> 500

Tableau 3 : Classification des paramètres pollués selon cinq classes de qualité (IQM).

IQM	Contamination fécale
4,3 – 5,0	Nulle
3,5 – 4,2	Faible
2,7 – 3,4	Modérée
1,9 – 2,6	Forte
1,0 – 1,8	Très forte

Les méthodes de traitement des données sont basées sur une représentation graphique de la variation des paramètres analysés sur ces eaux.

Les logiciels qgis 3.12 et Microsoft Excel ont conduit à la réalisation de cartes de localisation et de spatialisation des paramètres mesurés sur ces eaux et de l'indice de la qualité microbiologique (IQM).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Ci-dessous, nous présentons le résultat des analyses physicochimiques et microbiologiques. Le traitement des résultats physicochimiques par le logiciel de diagramme ainsi que les valeurs calculées de l'indice de la qualité de l'eau à partir du résultat des analyses physicochimiques et de l'indice de la qualité microbiologique des eaux à partir des résultats des analyses microbiologiques des eaux échantillonnées au niveau des différents producteurs. A partir des résultats des analyses physicochimiques (tableau 3) nous parvenons au digramme de piper (figure3).

Tableau 3 : Paramètres physicochimiques des eaux

Producteur	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃	NO ₂	Na ⁺	K ⁺	Fe tot.
P1	0,21	0,08	0,01	0	0,7	2,5	0,24
P2	0,24	0,63	0,01	0	0,48	0,1	0
P3	0,18	0,27	0	0	0,43	0,31	0
P4	0,45	0,15	0,01	0	0,96	0,1	0
P5	0,25	0	0	0	0,3	0,08	0
P6	0,39	0	0,02	0	0,39	0,08	0
P7	0,34	0,44	0,01	0	1,74	0,08	0
P8	0,31	0,29	0,01	0	0,57	0,08	0
P9	0,38	0,56	0	0,04	0,48	0,09	0
P10	0,17	0	0,01	0	0,7	0,11	0

Tableau 3 suite

Producteur	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	pH	cond (CE)
P1	25,6	8,26	2,96	7,86	330
P2	1,37	0,16	1,6	8,04	440
P3	0,8	6,56	2	7,76	300
P4	1,88	0,77	4	8	340
P5	2	0,37	3,2	8,24	310
P6	0,86	0,26	1,6	8	300
P7	0,6	0,04	2,4	6,92	180
P8	0,95	0,11	1,6	7,24	190
P9	1,2	0,51	1,74	7,93	130
P10	1,56	0,04	2,9	8,37	370

Sur le plan physicochimique les paramètres mesurés sur ces eaux répondent aux normes fixées par l'OMS pour une eau de consommation.

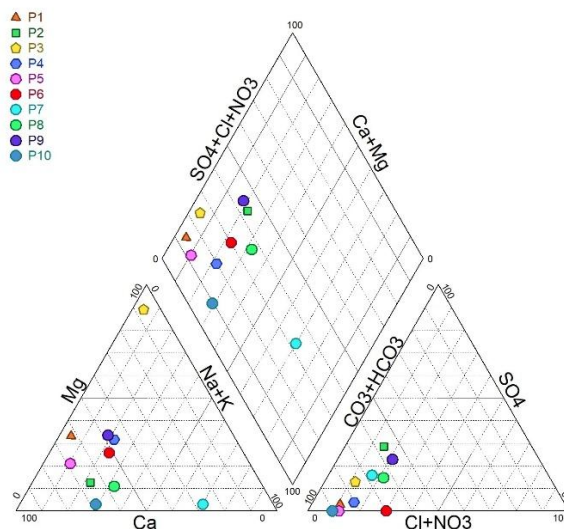


Figure 3 : Faciès des eaux

L'analyse du diagramme de piper nous révèle deux types de faciès, 90% des eaux échantillonnées présente un faciès bicarbonaté calcique et les 10% présente un faciès bicarbonaté sodique potassique.

Le tableau 4 présente les indices de la qualité des eaux. Il ressort de ces résultats que chez 90% des producteurs les eaux sont de qualité excellente et chez 10% cette qualité est mauvaise.

Le tableau 4 : Indice de la qualité des eaux

Nom	IQE
P1	70,7549655
P2	2,30045846
P3	2,32061186
P4	2,29796679
P5	2,35655536
P6	2,28337765
P7	1,9757587
P8	2,06621023
P9	2,38003573
P10	2,39488155

La répartition des paramètres microbiologiques est donnée par les figures 4 et 5.

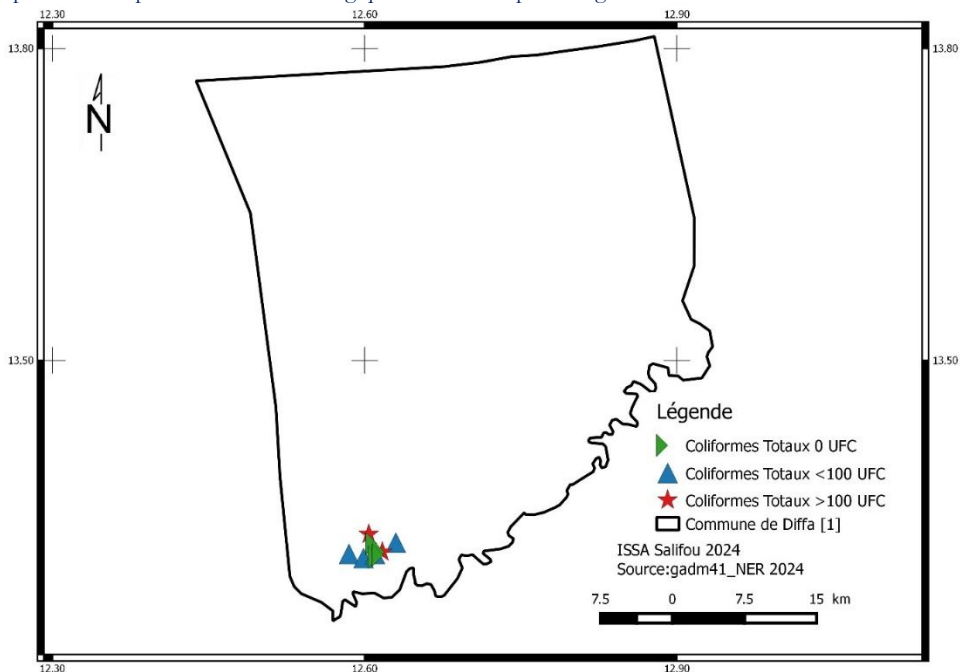


Figure 4 : Carte de la variation des coliformes totaux

La détermination des coliformes totaux sur ces eaux a révélé une absence de ce paramètre sur 40% des échantillons, avec un taux inférieur à 100 UFC sur 40% des échantillons et un taux supérieur à 100 UFC sur les 20%. Nos résultats sont respectivement largement supérieurs à ceux Dieng *et al.* [10] qui ont enregistré 15% de coliformes totaux sur les échantillons d'eau de boisson conditionnés en sachet vendues dans la région de Dakar

au Sénégal et ceux de Soncy *et al.* [6] qui ont observé une présence de coliformes totaux sur 26,72% des échantillons d'eau de forages de Lomé au Togo, mais restent respectivement inférieurs à ceux de Soumaré [14] qui a relevé la présence de coliformes totaux sur 73% des échantillons d'eau de boisson vendues sur la voie publique à Dakar, de Zerhouni *et al.* [8] qui ont enregistré sur les eaux souterraines périurbaines de la ville de Sebaa Ayoun (Meknes, Maroc) une présence de coliformes sur 88,88% de l'échantillon total et de Benajiba *et al.* [5] qui ont relevé sur les eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc une présence de coliformes totaux sur l'ensemble des ouvrages.

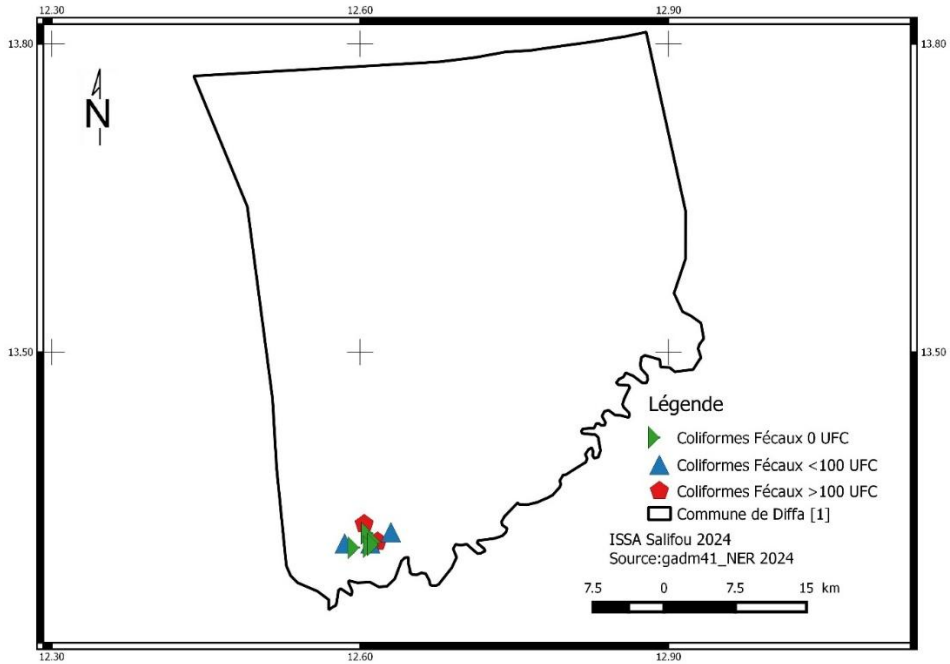


Figure 5 : Carte de la variation des coliformes fécaux

La détermination des coliformes fécaux sur ces eaux nous a révélé une absence de ce paramètre sur 50% des échantillons, avec un taux inférieur à 100 UFC sur 30% des échantillons et un taux supérieur à 100 UFC sur les 20%. Nos résultats sont supérieurs à ceux de Diop [15] qui a observé la présence de coliformes thermo tolérants sur les eaux de boisson conditionnées en sachet et vendues sur la voie publique dans la région de Dakar sur 30% des échantillons. Cependant ils se rapprochent de ceux de Soumaré [14] qui a observé la présence de coliformes fécaux sur 56% des échantillons des eaux de boisson vendues sur la voie publique à Dakar. Ils restent néanmoins inférieurs à ceux de Zerhouni *et al.* [8] qui ont travaillé sur les eaux souterraines périurbaines de la ville de Sebaa Ayoun (Meknes, Maroc) avec une présence sur 77,77% de l'échantillon total et de Benajiba *et al.* [5] qui ont travaillé sur les eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc avec une présence de 96,66% de coliformes fécaux sur l'ensemble des ouvrages.

L'interprétation des valeurs de l'indice de la qualité microbiologique (IQM) indique le niveau de la contamination fécale observé des eaux (figure 6).

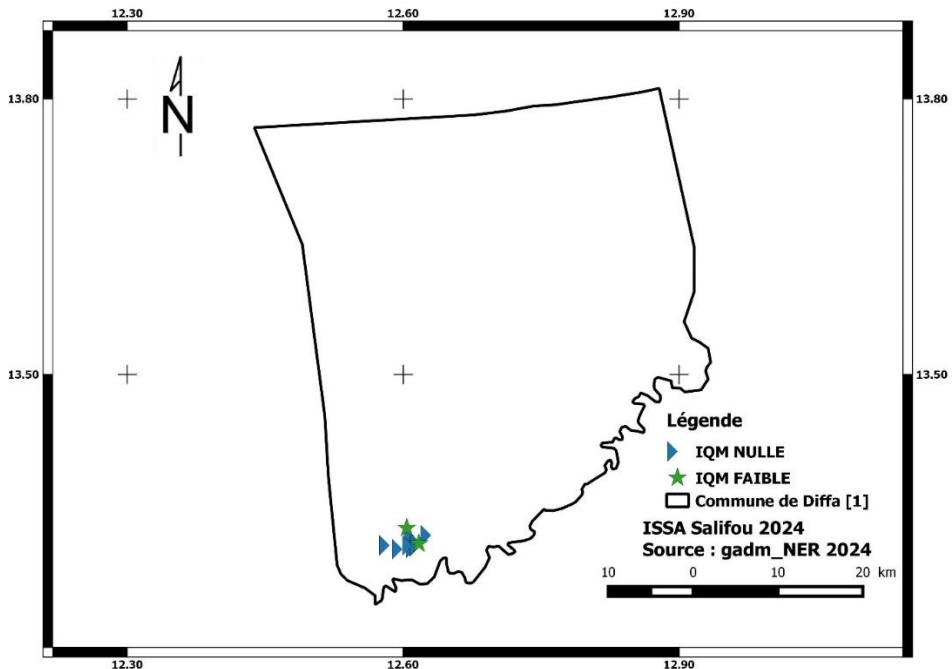


Figure 6 : Carte de la répartition de l'IQM

La figure 6 nous révèle que chez 80% des producteurs l'indice de la qualité microbiologique est compris entre $4,3 < IQM < 5$ ce qui veut dire que la contamination fécale est nulle chez ces producteurs. D'où une conservation de la qualité microbiologique de l'eau chez ces derniers. Chez 20% des producteurs l'indice de la qualité microbiologique est compris entre $4,2 < IQM < 3,5$ ce qui veut dire que la contamination fécale est faible chez ces producteurs. D'où une détérioration de la qualité microbiologique de l'eau chez ces derniers. Ces résultats sont inférieurs à ceux de Hounsou *et al.* [7] qui ont observé un IQM faible en saison sèche comme en saison des pluies sur l'ensemble des forages de la commune d'Abomey-Calavi au Bénin. Cependant ces résultats restent supérieurs à ceux de Issa *et al.* [16] qui ont observé un IQM nulle sur les eaux de forage de Belbedji au Niger.

CONCLUSION

A l'issue de cette étude les eaux produites par les différents producteurs révèlent deux types de faciès autour d'un seul anion dont des faciès de type bicarbonaté calcique et des faciès de type bicarbonaté sodique potassique. Sur le plan physicochimique ces restent conformes aux normes de potabilité cependant le calcul de l'IQE révèle une faible proportion d'eau de mauvaise qualité. Sur le plan microbiologique 60% des échantillons présentent des coliformes totaux alors qu'il est observé des coliformes fécaux sur 50% des échantillons. La détermination de l'indice de la qualité microbiologique a révélé à un IQM faible sur 20% des échantillons ce qui dénote d'une contamination fécale de ces eaux signe d'une détérioration majeure de la qualité des eaux. Ainsi microbiologiquement la moitié des échantillons retenus n'est pas potable.

Une enquête sociologique couplée à des analyses qualités des eaux sur les processus de production des eaux en sachet permettra de mieux discriminer l'origine de la pollution.

Références

- [1] S. Issa, A. Alassane, A. Zanguina, I. Natatou, M. Boukari, D. Sohounhloue, D. Mama, Hydrogeochemical Characterization of Continental Inter calary, Terminal, the Base and the Korama Aquifers Groundwater Found in five local Governments in the Zinder region in the Republic of Niger, Research Journal of Chemical & Environmental Sciences, 3(2015), 9-16.
- [2] M, B. Hounsou, E, K. Agbossou, B. Ahamide, I. Akponikpe, Qualité bactériologique de l'eau du bassin de l'Ouémé: Cas des coliformes totaux et fécaux dans les retenues d'eau de l'Okpara, de Djougou et de Savalou au Bénin, International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4(2010) 377-390.
<https://doi.org/10.4314/Ijbcsc.V4i2.58128>

- [3] B, M. Sahirou, M, S. Laouali, A, A. Mahamane, H, H. Adamou, H. Amadou, A, S. Manzola, B, G. Hassane, Evaluation de la qualité des "pure water" vendues à Niamey (Niger), Int. J. Biol. Chem. Sci. 14(9) (2020), 3412-3427. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v14i9.35>
- [4] O, L, R. Akiyo, Consommation de l'eau en sachet et ses effets socio-environnementaux dans la Commune de Parakou, Int. J. Biol. Chem. Sci. 11(4) (2017), 1727-1740. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i4.25>.
- [5] M, H. Benajiba, Y. Saoud, A. Lamribah, M. Ahrikat, N. Amajoud, O. Ouled-Zian, Evaluation de la qualité microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc, Revue des Sciences de l'Eau 26 (3) (2013), 223-233.
- [6] K. Soncy, B. Djeri, K. Anani, M. Eklou-Lawson, Y. Adjrah, D, S. Karou, Y. Ameyapoh, C. De Souza, Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits et de forage à Lomé, Togo, Journal of Applied Biosciences 91 (2015), 8464 – 8469.
- [7] D. Mama, F. Dovonou, A. Alasane, Seasonal evolution of the quality microbiological of the natural waters in the township of Abomey-Calavi (South Benin), British Journal of Earth Sciences Research 3(1) (2015), 30-41.
- [8] J. Zerhouni, F, F. Rhazi, A. Aboulkacem, Qualité et facteurs de risque de pollution des eaux souterraines périurbaines de la ville de Sebaa Ayouné (Meknes, Maroc), Larhyss Journal 22 (2015), 91-107.
- [9] S. Issa, Valorisation d'un matériau local (une argile de Kolmé dans le Liptako) dans le traitement des eaux souterraines à forte teneur en ions fluorures et état bactériologique de l'eau de la collecte au point de stockage dans la région de Zinder au Niger, Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey Calavi, 2019.
- [10] M. Dieng, J. Kindossi, N. Diop, M. Mbengue, Qualité Des Eaux De Boisson Conditionnées En Sachet Vendues Dans La Région De Dakar Au Sénégal European Scientific Journal, ESJ, 17(21) (2021), 104-114. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n21p104>
- [11] C, A, P. Gantzer, J, M. Audic, L. Schwartzbrod, Detection of Infectious Enteroviruses, Enterovirus Genomes, Somatic Coliphages, and Bacteroides fragilis Phages in Treated Wastewater, Applied and Environmental Microbiology, 64 (1998), 4307- 4312.
- [12] ONU, L'eau une responsabilité partagée, 2ème Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 2007. http://www.unesco.org/water/wwap/index_fr.shtml 797 S.
- [13] Constantin, M. Leroux, R. Amable, M.-C. Mesnardrobbe, A. Rimbault, C. L'eau en capitale, Paris Info.
- [14] I, G. SOUMARE, Contribution à l'étude de la qualité hygiénique des eaux de boisson vendues sur la voie publique, Th : Méd. vet : Dakar, 1997.
- [15] C, I, K. DIOP, Etude de la qualité microbiologique des eaux de boisson conditionnées en sachet et vendues sur la voie publique dans la région de Dakar. Mémoire de diplôme d'études approfondies de productions animales, Université Cheikh Anta Diop, 2006.
- [16] S. Issa, D. Mama, A. Zanguina, I. Natatou, M. Boukari, D. Sohounhloué, Study of Microbiological Quality along the Water Chain in Belbedji in the Republic of Niger, Journal of Environmental Protection, 8 (2017). 787-798. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.87049>

Cartographie des zones à risque d'inondation dans la commune d'athiémié au sud-ouest du Bénin

Moutakilou Assoumanou¹, Alda S. Y. Yemadje, W. Arnaud A. Akakpo

Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire de l'Enseignement Technique, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey, Abomey, Bénin.

Résumé

La variabilité climatique observée ces dernières décennies se traduit par une recrudescence d'inondations, affectant gravement les populations et leurs biens. La commune d'Athiémié, située au sud-ouest du Bénin, est particulièrement vulnérable en raison des précipitations extrêmes et des crues du fleuve Mono. Dans ce contexte, la présente étude vise à cartographier les zones à risque d'inondation afin de fournir un outil d'aide à la décision pour la prévention et la gestion de ce phénomène.

La méthodologie adoptée s'est appuyée sur une recherche documentaire, des enquêtes de terrain, le traitement des données recueillies et l'analyse des résultats. Les informations pluviométriques et démographiques ont permis de caractériser les dynamiques hydrologiques et sociales d'Athiémié. Au total, 155 personnes ont été interrogées. Les données ont ensuite été soumises à une analyse statistique descriptive, comparative et analytique. Le volet cartographique a été réalisé avec le logiciel ArcGIS 10.4, grâce à la reclassement et à la combinaison des facteurs liés aux inondations. Ce processus a permis de produire des cartes d'aléa et de vulnérabilité, distinguant trois niveaux de risque allant du faible au fort.

Les résultats révèlent que les zones à risque faible représentent environ 63,16 % de la superficie totale et se localisent principalement dans la partie nord de la commune. Les zones à risque moyen, quant à elles, couvrent 24,43 % du territoire et sont réparties de manière diffuse. Elles apparaissent principalement dans les secteurs caractérisés par une pente modérée. Les zones à fort risque d'inondation occupent 12,41 % de la surface communale et se concentrent dans les plaines alluviales, le long des cours d'eau, notamment dans les régions nord et ouest. Cette cartographie constitue un instrument stratégique pour anticiper et gérer efficacement les inondations dans la commune d'Athiémié.

Mots clés : commune d'Athiémié, risque d'inondation, inondation, cartographie

Mapping of flood-prone areas in the commune of Athiémié in southwestern Benin

Abstract

The climate variability observed in recent decades has resulted in an increase in flooding, severely impacting populations and their property. The municipality of Athiémié, located in southwestern Benin, is particularly vulnerable due to extreme rainfall and flooding of the Mono River. In this context, this study aims to map flood-prone areas to provide a decision-making tool for the prevention and management of this phenomenon.

The methodology employed relied on a literature review, field surveys, data processing, and results analysis. Rainfall and demographic data were used to characterize the hydrological and social dynamics of Athiémié. A total of 155 people were interviewed. The data were then subjected to descriptive, comparative, and analytical statistical analysis. The mapping component was created using ArcGIS 10.4 software, through the reclassification and combination of factors related to flooding. This process enabled the production of hazard and vulnerability maps, distinguishing three levels of risk ranging from low to high.

The results reveal that low-risk areas represent approximately 63.16% of the total surface area and are located primarily in the northern part of the municipality. Medium-risk areas, on the other hand, cover 24.43% of the territory and are distributed more diffusely. They appear mainly in areas characterized by a moderate slope. Areas at high risk of flooding occupy 12.41% of the municipal surface area and are concentrated in the alluvial plains, along waterways, particularly in the northern and western regions. This mapping constitutes a strategic tool for anticipating and effectively managing floods in the municipality of Athiémié.

Keywords: Athiémié municipality, flood risk, flooding, mapping

¹ Corresponding author : assoukilou@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les changements climatiques constituent aujourd'hui une menace majeure pour l'environnement et le développement durable (J. Affouda, 2015, p. 5). Selon le quatrième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC, 2007, p. 65), les communautés pauvres et les personnes âgées dans les pays en développement comme dans les pays développés sont particulièrement vulnérables du fait de leurs situations économiques défavorables, des stress multiples et de leurs capacités d'adaptation limitées. Les manifestations climatiques (inondations, sécheresse, etc.) qui sont pour la plupart éprouvantes pour les hommes sont si variées que les risques liés au climat sont constamment d'actualité. Outre les pertes en vies humaines et en biens matériels qu'ils peuvent engendrer, ces risques peuvent causer, faute d'une gestion adéquate, des migrations massives de populations, des désastres écologiques ainsi que des pénuries de vivres, d'énergie, d'eau et bien d'autres biens essentiels (OMM, 2006, p. 22).

L'Afrique de l'Ouest, où la plupart des pays ont une économie basée sur une agriculture pluviale, apparaît comme une région particulièrement sensible aux fluctuations pluviométriques. Le Bénin à l'égard des pays de l'Afrique de l'Ouest subit les affres des risques climatiques (S. S. P. Houssou-Goé, 2008, p. 4). Pour E. Amoussou (2010, p. 173), les régimes fluviaux enregistrent des variations interannuelles très sensibles avec pour corollaire des inondations et l'assèchement des lits. Ces phénomènes s'observent surtout dans les régions situées dans les plaines d'inondation des grands systèmes fluviaux du Bénin. La commune d'Athiémé en fait partie intégrante.

Les effets du changement climatique se traduisent dans la commune d'Athiémé surtout par l'allongement des saisons sèches qui se conjuguent avec les inondations répétées qui surviennent avec les crues du fleuve Mono ou après les pluies diluviennes (M. Kpogla Anago, 2018, p. 10). En dehors de ces inondations annuelles parfois malvenues auxquelles les populations s'adaptent, le fleuve Mono sort dangereusement de son lit, suite aux fortes pluies qui ont souvent lieu au mois de septembre à octobre, occasionnant d'importants dégâts tant humains que matériels (E. Atiyè, 2017, p. 210).

Pour faire face aux inondations et atténuer leurs effets sur les populations et les infrastructures, il convient donc d'effectuer une analyse minutieuse de la pluviométrie en s'appuyant sur la variabilité des pluies extrêmes. (Hounton et al, 2019, p. 1).

Dans le contexte où les inondations constituent un enjeu majeur pour les municipalités touchées par ce phénomène, il devient important d'analyser de façon détaillée les zones à risque dans les différents secteurs (zones urbaines, agricoles, etc.) soumis à des inondations périodiques. De plus, la plupart des méthodes actuelles d'analyse du risque lié aux inondations se limitent à la cartographie de l'aléa lui-même, et ne prennent pas en compte les aspects sociaux et économiques de la vulnérabilité, qui sont eux aussi des composantes importantes du risque (M. Tanguy, 2012, p. 12).

La cartographie des inondations et des plaines inondables se présente donc comme un moyen efficace de faire progresser nos connaissances face à ce phénomène naturel, tout en améliorant la sécurité des populations, et permet d'évaluer et de représenter l'étendue des zones submergées lors des inondations.

Pour une meilleure gestion des inondations, cette étude vise à réaliser une cartographie des risques d'inondation dans la commune d'Athiémé.

PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE

La commune d'Athiémé, une des six communes du Mono est située au sud-ouest de la République du Bénin. Elle couvre la façade méridionale du département du Mono sur 40 km de côte en bordure du fleuve Mono qui constitue sa frontière naturelle avec la République du Togo. Elle est localisée entre les parallèles 6°28' et 6°40' de latitude nord et les méridiens 1°35' et 1°47' de longitude est. Elle est limitée au nord par la commune de Lokossa, au sud par celle de Grand-Popo, à l'est par la commune de Houéyogbé et à l'ouest par la République Togolaise. La commune est subdivisée en 61 villages et quartiers de ville répartis sur cinq (5) arrondissements. La figure 1 présente la situation géographique de la commune d'Athiémé.

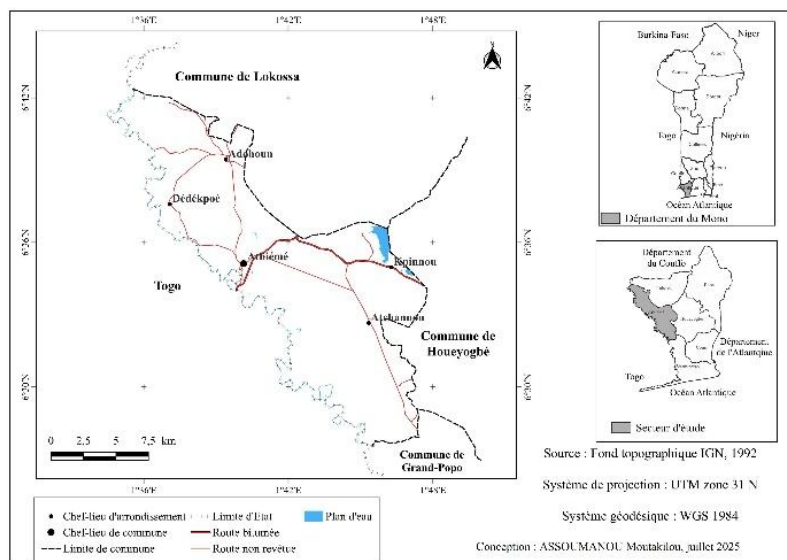


Figure 1 : Situation géographique de la commune d'Athiémé

DONNEES ET METHODES

Données utilisées

Les données collectées dans le cadre de cette recherche sont à la fois quantitatives et qualitatives. Les données pluviométriques annuelles de 1983 à 2023 obtenues à Météo-Bénin, les données sur les débits d'eau du fleuve Mono sur la période 1983-2023 obtenues à la Direction Générale de l'Eau du Bénin, les données démographiques et socioéconomiques obtenues à l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INStAD) ont été collectées et traitées. Les données planimétriques sont constituées des images Landsat de type Oli Tirs 08 de 2018 et le Modèle Numérique de Terrain de type SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponible sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov> d'une résolution de 30m x 30m. Les feuilles géologiques de Lokossa à l'échelle 1/30000e ont été également utilisées.

Méthodes utilisées

Enquêtes de terrain

Pour atteindre les objectifs fixés, les enquêtes de terrain ont été effectuées auprès des ménages au moyen d'un questionnaire et du guide d'entretien pour recueillir des informations qualitatives sur les inondations dans le secteur de l'étude.

Ces enquêtes de terrain sont réalisées dans toute la commune et dans des villages caractérisés par une proximité avec le fleuve ou les zones inondables. La taille de l'échantillon est déterminée par la théorie probabiliste de Schwartz (1995), qui s'écrit :

$$X = Z_{\alpha}^2 \times P \times Q / I^2$$

Avec X = la taille de l'échantillon ;

$Z_{\alpha} = 1,96$: Ecart réduit correspondant à un risque α de 5 %

P = proportion des ménages retenus

Q = 1-P

I^2 = marge d'erreur qui est égale à 5%.

Au total le nombre de personnes enquêtées est de 155 réparties dans les cinq arrondissements. La sélection des personnes à interroger a été faite par la méthode de choix raisonné en fonction du sexe, de l'âge et des classes professionnelles. Le choix des personnes interviewées repose sur les critères suivants :

- avoir été victime des inondations : les victimes pourront mieux relater les faits vécus, les impacts et les stratégies d'adaptation développées face aux inondations ;
- avoir au moins trente (30) ans d'âge pour être capable de comprendre l'objet de la recherche ;
- avoir régulièrement vécu dans la localité au cours des dix (10) dernières années afin de pouvoir mieux apprécier les réalités du milieu.

Les catégories sociales interrogées regroupent des agriculteurs, des pêcheurs, des éleveurs, des commerçantes ainsi que des autorités locales. Ces acteurs ont répondu aux questions posées selon leur disponibilité et leur volonté, en fournissant des informations parfois détaillées et complètes, parfois plus partielles.

Méthode de détermination des zones à risque d'inondation

Pour obtenir la carte du risque d'inondations, la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été faite. Le risque d'inondation est défini comme le croisement de l'aléa préalablement défini et à la vulnérabilité. Un aléa d'inondation fort dans une zone faiblement vulnérable est fortement risqué. Les principales étapes d'analyse de la vulnérabilité à l'inondation et du risque d'inondation sont résumées par la figure suivante :

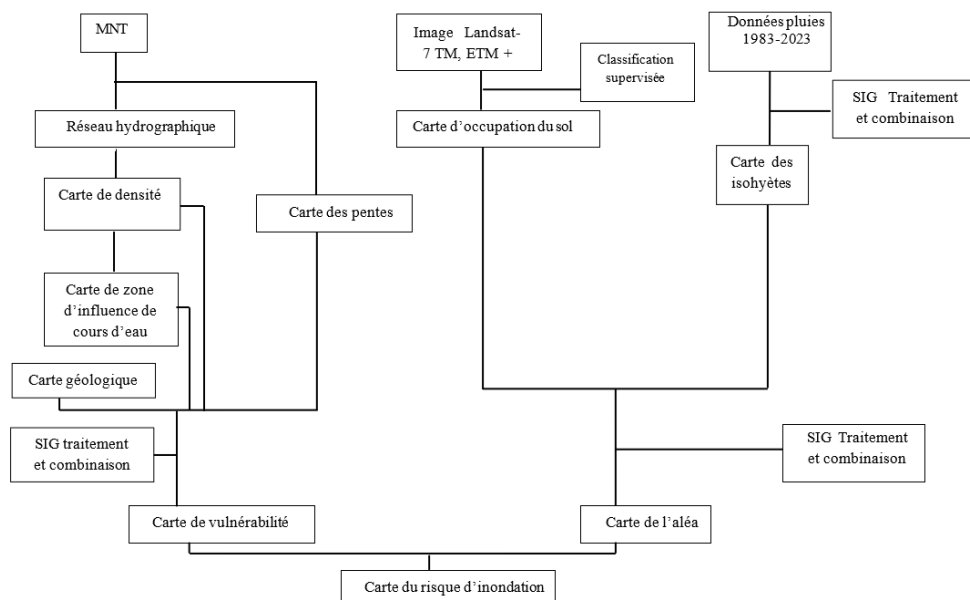


Figure 2 : Organigramme des étapes de cartographie du risque d'inondation

Source : Saley et al., (2005)

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats

Caractérisation pluviales de la commune d'Athiémé

Les caractéristiques de l'aléa d'inondation et des crues dans la commune d'Athiémé passent par une étude de la pluviométrie et des débits du fleuve Mono (figure 3)

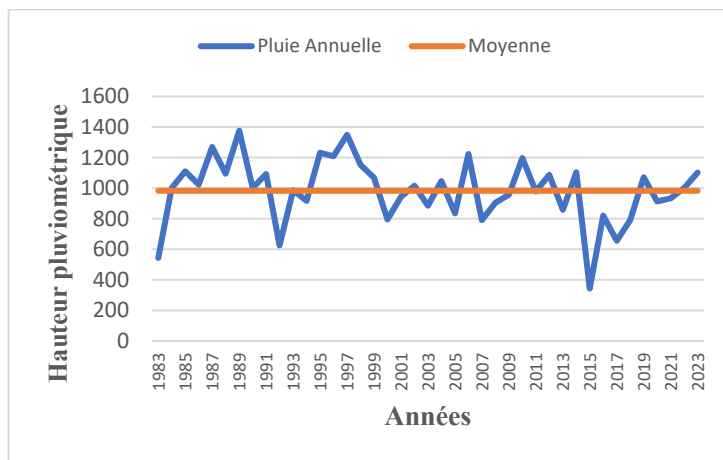


Figure 3 : Variabilité interannuelle de la pluie

Source : Météo Bénin, Juin 2025

L'examen de la figure révèle que les hauteurs annuelles de précipitations enregistrées dans la commune d'Athiémé oscillent entre 727 mm et 1177 mm, avec une moyenne annuelle estimée à 952 mm sur la période d'étude. Cette variabilité interannuelle exerce une influence significative sur les activités agricoles locales, notamment en raison des difficultés rencontrées par les agriculteurs pour anticiper et gérer les années extrêmes, qu'elles soient déficitaires ou excédentaires.

Les années caractérisées par des précipitations nettement inférieures à la moyenne sont : 1983 (544 mm), 1992 (625,9 mm), 2015 (343 mm), 2016 (617 mm) et 2017 (656 mm). Ces années sont marquées par des déficits hydriques susceptibles de compromettre les rendements agricoles et d'aggraver la vulnérabilité des systèmes de production.

La série comprend plusieurs années dont les hauteurs de pluie se rapprochent de la moyenne annuelle, traduisant une relative stabilité du régime pluviométrique. Il s'agit des années 1981, 1982, 1984, 1986, 1988, 1991, 1993, 1994, 1995, 1999, de 2000 à 2005, 2007, 2008, 2009, de 2011 à 2014, 2016, et de 2018 à 2021. Les hauteurs enregistrées au cours de ces années varient entre 678 mm et 1232,2 mm, traduisant une pluviométrie modérée.

Les années 1985 (1110 mm), 1987 (1269 mm), 1989 (1376 mm), 1996 (1208,7 mm), 1997 (1348,6 mm), 2006 (1223 mm), 2010 (1196,9 mm) et 2015 (1191,9 mm) présentent des hauteurs de pluie largement supérieures à la moyenne. Ces excès pluviométriques sont souvent associés à des phénomènes d'inondation, avec des impacts notables sur les infrastructures, les cultures et les conditions de vie des populations riveraines.

Caractérisation fluviales de la commune d'Athiémé

La figure 4 présente les indices de variabilité interannuelle appliqués aux données de débits du fleuve Mono à Athiémé.

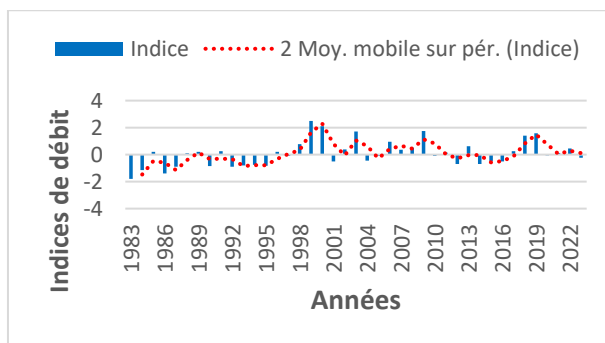


Figure 4 : Variabilité inter annuelle des débits d'eau du fleuve Mono à Athiémé

Source : Météo Bénin et traitement des données, 2025

De l'analyse de la figure 4, il ressort des indices positifs et négatifs qui varient de -1,8 à 2,5. Les indices positifs de 0 à 2,5 indicatifs des années marquées par des épisodes hydrologiquement humides voire extrêmement humides caractérisent les événements d'écoulement et de débordement du fleuve Mono. Ainsi, les années 1999, 2000, 2003, 2009, 2018, 2019 témoignent des années où le débit de l'eau est excédentaire et/ou on observe des événements de débordement, donc des années à risque d'inondation. De même, des années qui présentent des débits très faibles sont associées à des risques de sécheresse hydrologique. Il s'agit des années 1983, 1984, 1986, 1990 et 1992.

La figure 5 montre la variabilité inter mensuelle des côtes moyennes.

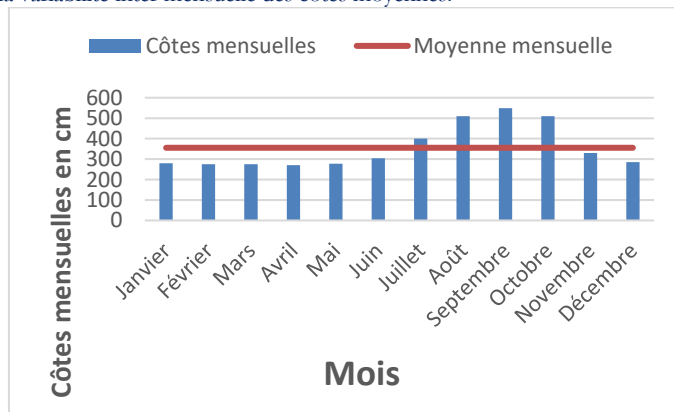


Figure 5 : Variabilité inter mensuelle des côtes moyennes mensuelles

Source : Direction Générale de l'Eau et traitement des données, 2025

L'analyse de la figure met en évidence trois grandes phases dans la variation annuelle des côtes moyennes du fleuve Mono dans la commune d'Athiémié, chacune correspondant à une dynamique hydrologique distincte.

La première phase couvre la période de janvier à mai et est appelée la phase de stabilité hydrique. Durant cette période, les côtes du fleuve restent pratiquement stationnaires, autour de 2,756 m. Cette stabilité s'explique par l'absence de précipitations significatives en début d'année. Les premières pluies, généralement observées en mars et avril, commencent par recharger les nappes phréatiques, avant que l'eau ne s'écoule vers le lit majeur du fleuve. Le niveau reste donc bas, avec un faible risque d'inondation.

La deuxième phase s'étend de juin à septembre. Cette phase est marquée par une augmentation rapide du niveau du fleuve, passant de 3,042 m, son niveau le plus élevé de l'année. La nappe étant déjà saturée à la fin de la première phase, les pluies abondantes de la saison humide provoquent une concentration des eaux et une élévation brutale du niveau du fleuve. Le mois de septembre constitue le point culminant, avec des débordements fréquents et des inondations majeures dans la commune. Les données de terrain confirment qu'août, septembre et octobre sont les mois les plus exposés à ces risques, septembre étant le plus redouté par les populations locales.

Pendant la dernière phase (phase de décrue), le niveau du fleuve amorce une baisse progressive qui passe de 5,487 m en septembre à 2,85 m en décembre. Cette décrue correspond à la fin de la saison des pluies et au retour d'un régime hydrologique plus stable. Toutefois, les effets résiduels des inondations peuvent persister, notamment en octobre, avec des sols saturés et des zones encore inondées.

Caractérisation des zones à risque d'inondation dans la commune d'Athiémié

➤ Cartographie de la vulnérabilité de la commune à l'inondation

Dans cette étude, pour l'analyse de la vulnérabilité de la commune à l'inondation, la technique de combinaison et de superposition des variables spatiales a été retenue. Les paramètres considérés incluent la densité de drainage, la nature géologique et la pente du terrain.

La densité de drainage : ce paramètre constitue un indicateur clé dans les stratégies de contrôle des crues. Il correspond à la longueur totale des cours d'eau rapportée à la surface du bassin (exprimée en km/km²). Une densité élevée traduit une forte capacité de ruissellement, ce qui accroît la probabilité d'inondation dans les zones concernées. La carte de drainage a été générée à l'aide de l'outil - Kernel Density intégré au logiciel ArcGIS.

La pente : les zones de faible pente sont particulièrement vulnérables aux inondations en raison de l'accumulation des eaux provenant des altitudes supérieures. La carte des pentes a été dérivée du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au format SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), disponible sur le portail «

<https://earthexplorer.usgs.gov> » avec une résolution de 30 mètres. L'extraction des pentes a été réalisée via l'outil slope dans le logiciel ArcGIS 10.4.

La géologie : ce facteur influence directement le comportement hydrologique du sol, notamment en matière d'infiltration et de stockage de l'eau. Les formations géologiques imperméables limitent l'infiltration des eaux pluviales, favorisant ainsi le ruissellement de surface en augmentant le risque d'inondation. Les données géologiques de la commune ont été extraites d'une carte géologique publiée par l'IGN (2018).

Le traitement des différentes variables a permis d'obtenir la figure 6, montrant les différentes cartes qui ont permis de déterminer la vulnérabilité à l'inondation de la commune d'Athiémé

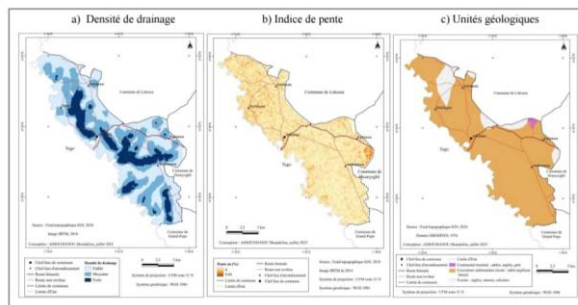


Figure 6 : Carte des différentes variables pour l'établissement de la vulnérabilité à l'inondation

La figure 6 montre les cartes des trois variables considérées pour la détermination de la vulnérabilité de la Commune d'Athiémé. Il s'agit de la carte de la densité de drainage, la carte des pentes et la carte des unités géologiques. Pour caractériser la vulnérabilité aux inondations, une échelle descriptive a été établie en fonction du poids de chaque variable dans le processus de vulnérabilité. Cette échelle varie de faible à fort. La figure 7 présente la vulnérabilité de la commune à l'inondation

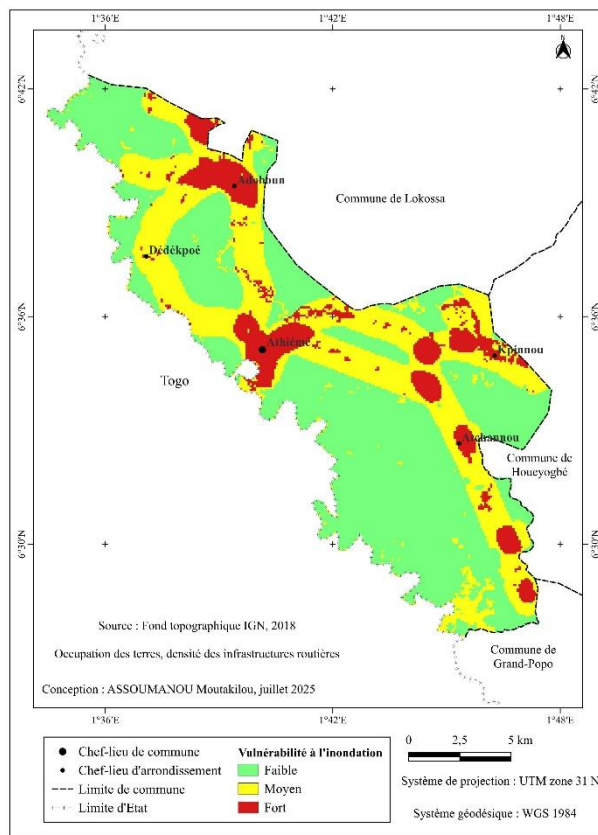


Figure 7 : Carte de la vulnérabilité de la commune d'Athiémé à l'inondation

L'analyse de cette figure 7, permet de mettre en évidence trois zones de vulnérabilité qui varient du faible au fort niveau. Les zones de faible vulnérabilité aux inondations couvrent 50,89 % de la superficie de la Commune, les zones de vulnérabilité moyenne représentent 32,36 % de la Commune et ce sont des zones à pente moyenne où le ruissellement ne permet pas à l'eau de stagner. Les zones de forte vulnérabilité couvrent 10,97 %. Ces zones concernent les plaines sujettes à la submersion et sont vraiment les zones où les pentes sont presque nulles. Elles couvrent les localités d'Atchanou, Kpinou, Athiémé, Dédépoé et Adohoun,

➤ Cartographie de l'aléa d'inondation

La carte des aléas d'inondation a été élaborée à partir de la superposition de deux couches thématiques : la carte l'humidité topographique et celle de l'occupation du sol.

L'occupation du sol : ce facteur constitue un déterminant majeur dans l'identification des zones potentiellement humides et exposées aux crues. Il influence directement le taux d'infiltration des eaux pluviales. Les zones couvertes par la forêt ou une végétation dense favorisent l'infiltration, réduisant ainsi le ruissellement. A l'inverse, les espaces urbanisés et les terres nues, caractérisés par une forte imperméabilité, accentuent le ruissellement et augmentent le risque d'inondation. La carte de l'occupation du sol a été produite à partir d'une image satellite Landsat OLI 08 TIRS, 2018.

L'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index – TWI) : C'est un outil puissant pour modéliser la distribution spatiale de l'humidité dans un bassin versant. Il est particulièrement utile en hydrologie, en écologie, et pour la cartographie des zones humides ou à risque d'inondation. Les données pluviométriques avec la pente ont été analysées dans la commune et ont permis d'identifier et de classer les zones humides.

La figure 8 présente la carte de l'occupation du sol et celle de l'indice d'humidité topographique

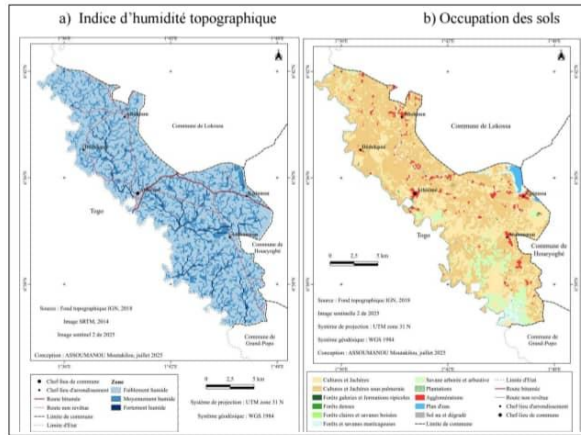


Figure 8 : Carte de l'indice d'humidité topographique et de l'occupation

L'aléa d'inondation comprend les zones dans lesquelles des inondations sont susceptibles de se produire, de façon plus ou moins importante et fréquente, suite aux fortes précipitations ou aux débordements des cours d'eau. La carte de l'aléa d'inondation représente donc des zones où il existe un risque élevé d'inondation, même aux endroits où aucune inondation n'est historiquement connue. Inversement, l'absence d'une zone d'aléa sur la carte ne peut garantir qu'une inondation ne s'y produise jamais (Koumassi, 2014). La carte de l'aléa (figure 9) est obtenue par la combinaison de la distribution des unités d'occupation du sol et de l'indice d'humidité topographique.

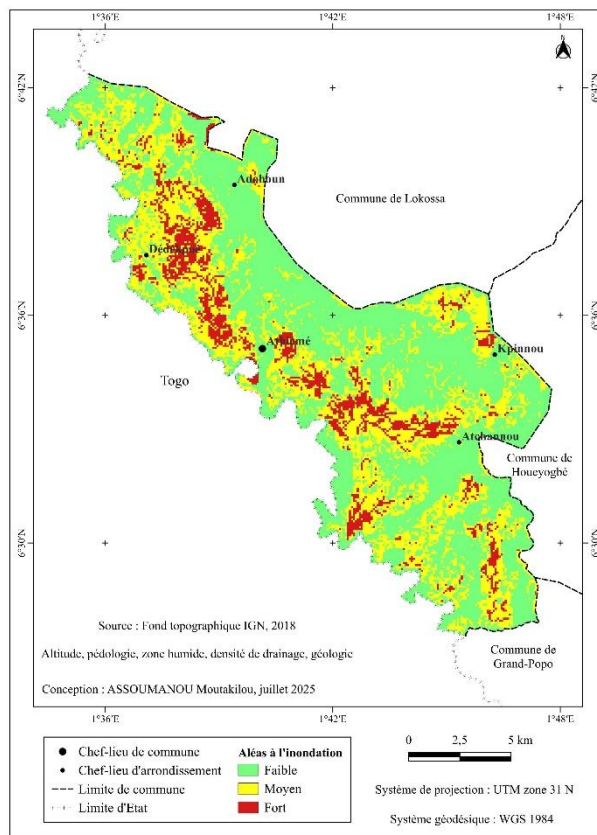


Figure 9 : Carte des aléas de l'inondation

De l'analyse de la figure 9, les aléas d'inondation dans la Commune d'Athiémé sont classés en trois niveaux, c'est-à-dire du faible au fort. La zone de faible aléa occupe 50,89 % de la superficie totale de la commune et se situe principalement dans le secteur à couvert végétal dense (forêt dense humide, semi-décidue) et à pente forte. Les zones des aléas moyens sont dispersées et représentent 34,47 % de la superficie de la commune tout en correspondant aux secteurs à couverture végétale moyennement dense (forêt claire, savane). Les zones à forts aléas à l'inondation occupent respectivement 14,63 % de la superficie de la commune et correspondent aux cultures et jachères, aux forêts galeries, aux habitations, aux plantations, aux plans d'eau.

➤ Cartographie du risque d'inondation

La cartographie des zones inondables constitue l'un des outils les plus efficaces pour la prévention des risques liés aux crues, en particulier celles provoquées par le débordement des cours d'eau. En effet, l'élaboration et la diffusion d'informations géospatiales sur les zones exposées lors d'événements pluvio-hydrologiques extrêmes permettent aux décideurs, aux populations riveraines et aux acteurs locaux de prendre les mesures nécessaires en amont de la survenue d'une catastrophe. La connaissance préalable de ces zones à risque facilite non seulement la mise en œuvre d'actions préventives, mais aussi l'organisation des dispositifs de secours, contribuant ainsi à la réduction de la vulnérabilité des communautés concernées (Koumassi, 2014).

Pour le cas de la commune d'Athiémé, le risque d'inondation a été évalué par le croisement de la carte de vulnérabilité à l'inondation avec celle de l'aléa, considéré comme le facteur déclencheur du phénomène, à l'aide des différents outils du Système d'information Géographique (SIG) selon la formule suivante : $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$. La Figure 10 illustre les secteurs identifiés comme étant à risque d'inondation dans cette commune.

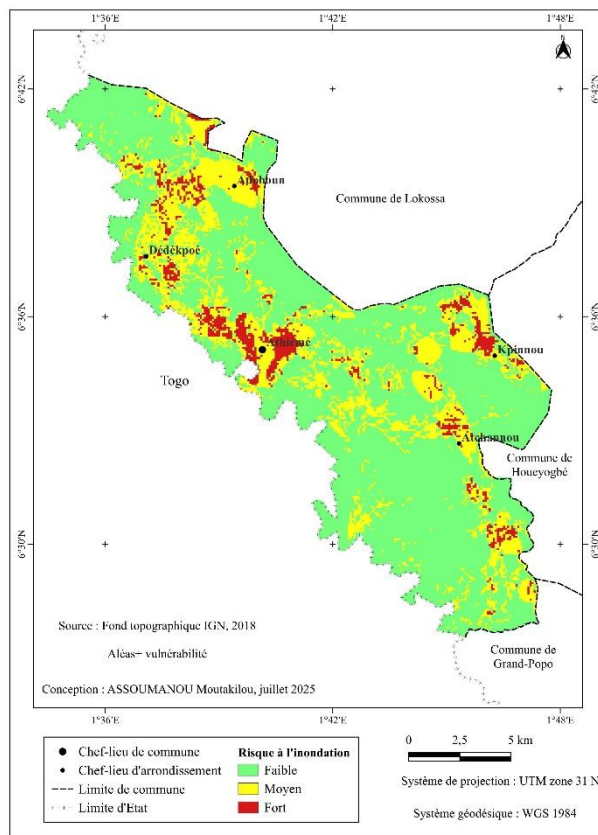


Figure 10 : Zones à risque d'inondation dans la commune d'Athiémé

L'examen de la figure 10 révèle une variation graduelle du niveau de risque d'inondation sur l'ensemble du territoire communal, allant du risque faible au risque élevé. Les zones à risque faible représentent environ 63,16 % de la superficie totale et se localisent principalement dans la partie nord de la commune. Les zones à risque moyen, quant à elles, couvrent 24,43 % du territoire et sont réparties de manière diffuse. Elles apparaissent principalement dans les secteurs caractérisés par une pente modérée.

Les zones à fort risque d'inondation occupent 12,41 % de la surface communale. Elles se concentrent dans les plaines alluviales, le long des cours d'eau, notamment dans les régions nord et ouest. Ces secteurs correspondent aux lits majeurs des rivières et aux zones agricoles, particulièrement vulnérables aux débordements fluviaux. Les localités les plus exposées se situent dans les parties centrales et sud-est de la commune, où la combinaison de facteurs topographiques et hydrologiques accentue le niveau de risque.

Discussion

La prévention des inondations constitue une étape essentielle dans la gestion globale du risque hydrologique. Dans le cadre de cette étude menée à Athiémé, plusieurs facteurs d'aléa et de vulnérabilité ont été identifiés, parmi lesquels la pente, la densité de drainage, la nature géologique, l'indice d'humidité topographique et l'occupation du sol.

L'approche méthodologique, fondée sur l'Analyse Multicritère couplée aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), a permis de délimiter les zones exposées aux inondations. Cette méthode, déjà validée par des travaux antérieurs (Koumassi et al., 2014 ; Gbaguidi et al., 2023 ; Ouassa, 2022), a conduit à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité.

Les résultats révèlent que la commune d'Athiémé présente une vulnérabilité particulièrement élevée. Ce constat rejoint les observations d'Atiyé (2017), qui souligne que chaque année, les terres fertiles de la basse vallée du Mono

sont submergées par les pluies et les crues du fleuve et des rivières environnantes, entraînant des pertes matérielles considérables et parfois humaines. Les principaux facteurs aggravants sont les fortes pentes, un drainage intense, une pluviométrie abondante, une accumulation d'eau significative, une densité démographique élevée et une pression anthropique marquée.

Ces résultats corroborent les recherches antérieures, notamment celles de Koumassi et al. (2014), qui mettent en évidence le rôle déterminant de la pluviométrie, de la lithologie, de la structure géologique, de la pente, de l'occupation du sol et de la densité de drainage dans la genèse des inondations. De même, Kouamé (2013) et Kouassi (2019) ont montré que la progression non maîtrisée de l'occupation du sol, la faible capacité d'évacuation des eaux et l'intensité des précipitations accentuent la vulnérabilité des territoires.

L'utilisation des SIG dans cette étude a permis de produire une cartographie précise des zones à risque, confirmant les résultats obtenus dans la basse vallée du Mono par Atiyè (2017). En définitive, cette carte constitue un outil de référence pour les autorités locales, en appui aux décisions liées à la sécurité des populations et à l'aménagement du territoire.

CONCLUSION

Cette recherche, consacrée à la cartographie et à l'analyse des inondations dans la commune d'Athiémé, s'appuie principalement sur l'exploitation d'outils cartographiques et de données hydroclimatiques. La méthodologie repose sur une combinaison de recherches documentaires, d'enquêtes de terrain et d'analyses statistiques et cartographiques. L'intégration des données satellitaires, pluviométriques et topographiques a permis de produire une cartographie détaillée des zones vulnérables.

Il ressort que les zones à risque faible couvrent 63,16 % de la superficie communale et se concentrent principalement au nord. Les zones à risque moyen, représentant 24,43 %, sont disséminées sur l'ensemble du territoire, notamment dans les secteurs à pente modérée. Les zones à fort risque d'inondation, occupant 12,41 %, se situent dans les plaines longeant les cours d'eau, principalement au nord et à l'ouest, et constituent des espaces particulièrement dangereux lors des crues.

Cette forte exposition impose une vigilance accrue et la mise en œuvre de mesures rigoureuses par les autorités locales afin de limiter les pertes humaines et matérielles. La carte de risque élaborée représente ainsi un outil stratégique de référence pour la planification sécuritaire et l'aménagement du territoire.

RÉFÉRENCES

- [1] Affouda J., (2015). *Mécanisme de gestion et d'adaptation aux catastrophes des risques climatiques dans la commune d'Abomey-Calavi*, Mémoire de Master en GRC, MIRD/IGATE/UAC, 90p
- [2] Amoussou E., (2010). *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Abémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 313 p.
- [3] Atiyè E., (2017). *Caractérisation des risques hydroclimatiques dans le bassin versant beninois du fleuve Mono à l'exutoire d'Athiémé*, Thèse de Doctorat unique de l'Université d'Abomey Calavi, Bénin, 273 p.
- [4] Dégbé-Kété N., (2013). *Péjoration pluviométrique et production vivrière dans la commune de Bopa*, Mémoire de maîtrise en Géographie, DGAT/FLASH/UAC, 73 p.
- [5] Diomande M., (2009). *Vulnérabilité de l'agriculture pluviale au changement de régime pluviométrique et adaptation des communautés rurales du «V-Baoulé» en Côte d'Ivoire*, 11 p.
- [6] Djessonou F., (2013). *Vulnérabilité et adaptation des productions vivrières aux tendances climatiques dans la Commune de Za-Kpota*, Mémoire de maîtrise en Géographie, DGAT/FLASH/UAC, 88p.
- [7] GIEC, (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~), GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.
- [8] Houssou-Goé S.S.P., (2008). *Agriculture et changements climatiques au Bénin : Risques climatiques, Vulnérabilité et stratégies d'adaptation des populations rurales du département du Couffo*, UAC/FSA/DESAC, 160 p.
- [9] INSAE-RGPH IV, 2013, *Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitat*, Cotonou, Bénin, 83p.
- [10] KOUAME K.; KOUADIO B.; YAO J. (2023) : Cartographie du risque d'inondation à Cocody et abobo-Abidjan (côte d'ivoire), 18p
- [11] KOUAME K. (2013) : Etude et prévention des risques d'inondation en milieu urbain par Télédétection et Système d'information géographique (SIG) : cas de la commune de Cocody Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). DEA d'hydrogéologie, 71p
- [12] KOUASSI D. (2019) : Apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la prévention et à la prévision du risque d'inondation dans la commune d'abobo (Abidjan, côte d'ivoire). Thèse de doctorat, 161p
- [13] KOUMASSI D. H. (2014) : Risques hydro-climatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la sota à l'exutoire de Coubéri. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 245 p.
- [14] KOUMASSI D. H.; TCHIBOZO A. E.; VISSIN E. W. et HOUSSOU C. S. (2014) : SIG et télédétection pour l'optimisation de la cartographie des risques d'inondation dans le bassin de la sota au Bénin. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 23 (2014) 137 – 152. DOI : <https://bec.uac.bj/uploads/publication/3a95d0bf6a967029e48ecc88c95dcd0d.pdf>
- [15] Kpogla Anago M.M., (2018). *Vulnérabilité de l'agriculture aux risques hydro-climatiques dans la commune de Lokossa*, Mémoire de Master en GRC, MIRD/IGATE/UAC, 98p

- [16] **Maboulou F.**, (2020). *Extrêmes hydroclimatiques et sécurité alimentaire dans la commune de Athiémé*, Mémoire de Master en GRC, MIRD/IGATE/UAC, 86p.
- [17] **OMM**, (2006). *Gestion intégrée des crues : aspects sociaux et participation des parties prenantes*, APFAM, politiques de gestion des crues, 106p.
- [18] **OUASSA P.** (2022) : Evènements hydroclimatiques extrêmes et sécurité alimentaire dans le bassin béninois de la Pendjari à l'exutoire de Porga. Thèse de doctorat, GAGIEE, CIPMA, UAC, 294p.
- [19] **Schwartz D.**, (1995). *Méthode statistique à l'usage des médecins et biologistes*, 4^e éditions, éditions médicales, Flammarion, Paris, 214 p.
- [20] **Sessou L.**, (2016). *Variabilité pluviométrique et production agricole dans la Commune de Lokossa*, Mémoire de maîtrise. DGAT/FLASH/UAC, Bénin, 69p.
- [21] **Vissin E.W.**, 2007, *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*, Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.
- [22] **Yèhouessi J.G.**, (2019). *Variabilité climatique et production du palmier à huile dans la commune de Djidja*, Mémoire de Master en GRC, MIRD/IGATE/UAC, 68p.



REPUBLIQUE TUNISIENNE

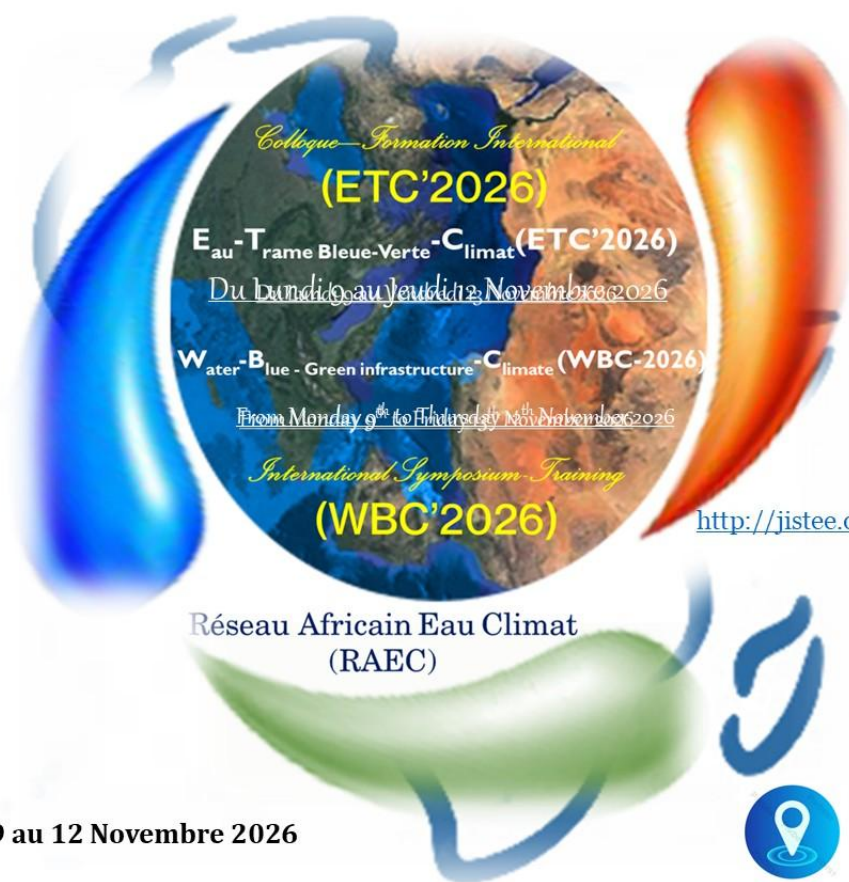


Colloque–Formation Internationale (ETC'2026)

Indexation : e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688

Réseau Africain Eau–Climat (RAEC)

Ressources en Eau, Trame Bleue - Verte et Changement Climatique



<http://jistee.org/etc2026/>



09 au 12 Novembre 2026

MORE INFO



Pr. Nouredine GAALLOUL

eauclimat@iresa.agrinet.tn and Cc eauclimat@yahoo.com

Hammamet (Tunisie)



International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET/JISTEE)

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V(x), Issue 1– May 2026 - jistee.org/volume-xi-2026/



Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Septembre 2026
Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – September 2026

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScdLJBkuyRY7pkPmXIENfr6UETqw3pBbnEI5J4ZpMJFhTbYwg/view_form?usp=dialog

✓ Open-access Journal

✓ Double-anonymous Peer Reviewing

✓ Fast Publication: 20-30 Days

<http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Septembre 2026

Le thème retenu pour 2026 est “Eau- Trame Bleue Verte – Climat”, en vous rappelant, si besoin en était, que le changement global couvre à la fois le changement climatique et les changements anthropiques (variations d’occupation des sols et aménagements des bassins versants, prélèvements, etc.).

Nous lançons donc un appel à contributions pour des articles (articles longs, courts, encadrés) qu’il vous paraîtrait intéressant de voir figurer dans ce numéro de la revue Scientifique : Journal International Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement (JISTEE).

Les contributions seront attendues pour le courant du mois de Février 2026 afin de pouvoir être révisées par le Comité Scientifique International et que la mise en forme du numéro ait lieu en Mars 2026 au plus tard.



Visiter notre site : <https://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – September 2026

International Journal of Water Science and Environment Technologies

Open access Journal are freely accessible via the internet for immediate worldwide. This Journal is an Open Access International Journal and will accept research and review manuscripts ranging from, Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects) ,...

The manuscript/ paper can be submitted via email to jistee@iresa.agrinet.tn or jistee@yahoo.com

to our online direct submission area, located here: <http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>



Invitation for Research Article – September 2026 Submit Your Paper WWW.JISTEE.org

e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688, | Open Access Journal |
Volume (xi) - Issue 1 – March 2026

Dear Researcher

We are happy to inform you that the International Journal Water Sciences and Environment Technologies of Current Advanced Research print and online journal, e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688, | Open Access Journal | is launching its next issue (September 2022). We would like to invite you to contribute your Research Article for publication in IJWSET.

We publish

- Original papers,
- Theory-based Empirical Papers,
- Review Papers,
- Case Reports,
- Conference Reports/Papers,
- Technology Reports,

Description :

- **Area of concentration:** Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects)
- **Frequency of publishing:** quaterly: March; June, September and December
- **Mode of publishing:** Print and online
- **Language of publication:** English and French

We invite you to submit your manuscript(s) to jistee@iresa.agrinet.tn (and CC jistee@yahoo.com) , for publication. Our objective is to inform authors of the decision on their manuscript(s) within 24h of submission. Following acceptance, a paper will be published in the Current issue.

With Warm Regards

Editor-In-Chief

IJWSET Journals

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET)

International Journal Water Sciences and Environment Technologies (IJWSET/JISTEE)

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

V(xi), Issue 1– May 2026 - jistee.org/volume-xi-2026/

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

| Open Access Journal |

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

CODEN: IJWSET OCLC Number: 828807274 ZDB-ID: 2703985-7

Volume (xi) - Issue 1 – May 2026

Water-Blue-Green-Infrastructure-Climate2026



Water-Blue Green Infrastructure-Climate:
Freshwater: Blue and Green

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and
the Environment in Tunisia (*ASTEE Tunisie*)